



TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Título: Aportes tecnológicos y científicos para la evaluación de alternativas en la provisión de arenas silíceas para fracturamiento hidráulico, en la industria hidrocarburífera argentina.

Autor: Lic. Diego Azcurra

Director: Dr. Carlos Herrmann

2024



RESUMEN

En Argentina el fracturamiento hidráulico o “fracking” se ha convertido en una herramienta clave para la producción de hidrocarburos, especialmente en la Formación Vaca Muerta de la Cuenca Neuquina, constituyendo las arenas un insumo esencial en este proceso. Las arenas síliceas se encuentran ampliamente distribuidas en Argentina, pero las que se explotan actualmente se localizan principalmente en las provincias de Entre Ríos, Río Negro y Chubut. La industria hidrocarburífera en un principio ha impuesto el uso de materiales de altísima calidad. Sin embargo, el criterio de aprovechamiento racional de los recursos debe promover la utilización de arenas de calidades intermedias, mediando un mixing adecuado y controlado entre calidades intermedias y superiores, fundamentalmente de los yacimientos más cercanos a los sitios de demanda actual y potencial, que puedan constituir alternativas viables de provisión a la industria hidrocarburífera. Para esto, es necesario avanzar en el conocimiento de los depósitos naturales de arenas síliceas, con herramientas útiles tanto en la exploración como en la determinación de calidad del producto. Las mediciones digitales de parámetros morfométricos a poblaciones de muestras, con las técnicas presentadas en este Trabajo, constituyen un aporte a las determinaciones de calidad de material. La teledetección de depósitos de arenas síliceas, como la desarrollada y presentada en este trabajo, ha validado su aplicación a partir de comparaciones con datos de gabinete (mapas geológicos) y de terreno (reconocimiento de depósitos de arena sílicea), y constituye una herramienta de aplicación inmediata y previa a la determinación de objetivos o targets exploratorios.

ABSTRACT

Hydraulic fracturing, or "fracking," is widely used in Argentina's hydrocarbon production, particularly in the Vaca Muerta Formation of the Neuquén Basin. Silica sands are essential for this process, and while Argentina has abundant silica sand deposits, the hydrocarbon industry initially focused on high-quality materials. However, it is important to promote the rational use of resources by considering the use of intermediate quality sands and mixing them with superior quality sands from deposits closest to current and potential demand sites. To achieve this, it is necessary further study natural deposits of silica sands and develop useful tools for exploration and quality determination. This includes digital measurement of morphometric parameters and remote sensing techniques, which have been shown to be effective in determining material quality. Remote sensing, as presented in this work, allows for the validation and immediate application of these techniques before determining exploration objectives or targets.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARENAS DE FRACTURACIÓN.....	13
4.1. Definición y tipos de materiales.....	13
4.1.1. Arenas silíceas	13
4.1.2. Arenas recubiertas con resina.....	14
4.1.3. Materiales cerámicos	14
4.2. Especificaciones técnicas	14
4.2.1. Procedimiento de muestreo	16
4.2.2. Tamaño de grano y distribución granulométrica	16
4.2.3. Redondez y esfericidad	17
4.2.4. Densidad bulk.....	17
4.2.5. Solubilidad en ácido	18
4.2.6. Turbidez.....	18
4.2.7. Resistencia a la compresión	18
4.2.8. Pérdida por ignición (LOI).....	18
5. MERCADOS.....	20
5.1. Mercado Global.....	20
5.2. MERCADO NACIONAL.....	21
5.2.1. Características de la oferta y demanda.....	21
5.2.2. Producción histórica.....	22
5.2.3. Consumo aparente, importación y exportación	23
5.2.4. Política arancelaria	24
5.2.5. Legislación minera aplicable	24
5.2.6. Licencia Social.....	27
6. DEPÓSITOS DE ARENAS SILÍCEAS	28
6.1. Ambientes geológicos de formación y calidad de arenas.....	28
6.2. Yacimientos de arenas silíceas en Argentina	30
6.2.1. Provincia de Río Negro	30

6.2.2.	Provincia de Chubut	31
6.2.3.	Provincia de Entre Ríos.....	32
6.3.	Producción de arenas silíceas nacionales	33
6.3.1.	Provincia de Entre Ríos.....	33
6.3.2.	Provincia de Chubut	34
6.3.3.	Provincia de Río Negro	34
7.	DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA TEDELEDETECCIÓN DE ÁREAS PROSPECTIVAS DE DEPÓSITOS DE ARENA SILÍCEA	36
7.1.	Fundamentos	36
7.2.	Espectroscopía de minerales y rocas con datos ASTER.....	37
7.3.	DESARROLLO METODOLÓGICO APLICADO	39
8.	DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA APLICADA AL ANÁLISIS DIGITAL DE LA MORFOMETRÍA DE ARENAS	47
8.1.	Preparación de muestras y adquisición de imágenes	47
8.2.	Software de análisis de imágenes	48
8.3.	Procesamiento de imágenes de arenas	48
9.	APLICACIÓN DE LOS DESARROLLOS LOGRADOS	52
9.1.	Teledetección de Depósitos de arena silícea en Argentina	52
9.2.	Medición de parámetros morfométricos de calidad de arenas con métodos digitales	54
9.3.	Mediciones	56
9.4.	Tratamiento estadístico	60
9.5.	Resultados	61
10.	TRATAMIENTO, LOGÍSTICA Y CONSIDERACIONES AMBIENTALES DE LAS ARENAS.....	64
10.1.	Tratamiento de arenas	64
10.1.1.	Proceso húmedo	64
10.1.2.	Proceso en seco.....	66
10.1.3.	Clasificación final	66
10.2.	Logística y Cadena de Suministro	66
10.2.1.	Desafíos de la Cadena de Abastecimiento	68
10.2.2.	Oportunidades de Mejora	68
10.3.	Consideraciones ambientales de la explotación de arenas	68
10.3.1.	Estudios y Recomendaciones	69
11.	CONCLUSIONES	71

12.	AGRADECIMIENTOS.....	73
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración esquemática de una operación de fracturación hidráulica y pozo horizontal. Fuente: (Fracturación hidráulica: una evaluación de Indiana Servicio Geológico y del Agua de Indiana)	8
Figura 2. Tipos de materiales apuntalantes y su relación en conductividad, costo y producción, modificado de Gallagher (2011).....	13
Figura 3. Imagen de muestra ampliada de arena de fractura "Northern White"(Northern White Frac Sands, U.S. Geological Survey, usgs.gov).....	15
Figura 4. Cuadro de Krumbein y Sloss (1951) utilizado para medición de parámetros de esfericidad y redondez en granos de arena.	17
Figura 5. Mercado global. Consumo de arenas síliceas por país (fuente UPME, 2018).....	20
Figura 6. Evolución de producción de arenas síliceas por provincia desde 2008 a 2018 (en toneladas por año). Fuente: Estadística Minera de la Secretaría de Política Minera de la Nación.	23
Figura 7. Gráfico de Importaciones de arenas síliceas y cuarzosas del período entre 2010 y 2018. Fuente secretaria de Minería de la Nación	24
Figura 8. Ubicación de las principales depósitos de arenas síliceas en Argentina. Las arenas de mayor calidad se encuentran en la provincia de Entre Ríos. (tomado de Macellari, 2022).	28
Figura 10. Producción de arenas síliceas de la provincia de Entre Ríos (en toneladas anuales). 33	
Figura 11. Producción de arenas síliceas de la provincia de Chubut (en toneladas anuales).....	34
Figura 12. Curvas espectrales para las bandas del SWIR de ASTER donde se puede apreciar los picos de absorción de los minerales de alteración hidrotermal. Espectros obtenidos de la librería espectral del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos).	38
Figura 13. Espectros de emisividad para distintas rocas: roca carbonática (a), cuarcita (b), granito (c), diorita (d), gabro (e), peridotita (f). Los puntos en los espectros muestran los valores de emisividad para las bandas del TIR del sensor ASTER. Tomado de Ninomiya (2004).	39
Figura 14. Carta imagen de Argentina: En verde se resalta la presencia de rocas con alto contenido de sílice.	43
Figura 15. Respuesta de teledetección de depósitos de arena sílicea (áreas en amarillo), sobre mosaico de imágenes LandSat 8 banda 5, del sector sur de la provincia de Entre Ríos.....	44
Figura 16. Respuesta de teledetección de depósitos de rocas y arenas síliceas (áreas en Verde) en el norte de la provincia de Río Negro y este de la provincia de Neuquén.	45

Figura 17. Respuesta de teledetección de depósitos de rocas y arenas silíceas (áreas en Verde en el centro y centro-este de la provincia de Chubut.....	46
Figura 18. Microscopio estereoscópico Greenough Leica S8 APO y cámara acoplada, utilizado para las observaciones en muestras de arena seleccionadas (Gentileza SEGEMAR).	47
Figura 19. Imagen de granos de arena obtenida a partir de lupa Leica.....	48
Figura 20. Imagen de granos de arena convertida a 2 bits de resolución radiométrica.....	49
Figura 21. En azul se muestra el perímetro del área convexa del objeto.	50
Figura 22. Ubicación del área de estudio sobre imagen satelital de alta resolución y valores de índice de sílice.	53
Figura 24. Distribución granulométrica original de la arena “in situ”, en la área de estudio.	55
Figura 25. Distribución granulométrica de la fracción silícea de la arena ensayada.	55
Figura 26. Imagen de arenas Texas Gold fracción malla 8/16.	56
Figura 27. Imagen de arenas Texas Gold fracción malla 30/50.	56
Figura 28. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena Texas Gold 8/16.	57
Figura 29. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena Texas Gold 30/50.	57
Figura 30. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 10/14.	58
Figura 31. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 14/20.	58
Figura 32. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 20/30.	59
Figura 33. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 20/40.	59
Figura 34. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 30/40.	60
Figura 35. Diagramas de caja de circularidad por fracción granulométrica de arena del área de estudio.....	61
Figura 36. Diagramas de caja redondez por fracción granulométrica de arena del área de estudio.	61
Figura 37. Resultado de los índices de esfericidad y redondez de todas las fracciones granulométricas de la arena estudiada.....	63
Figura 38. Cilindro lavador para realizar el lavado primario. Fuente: Bouso, 2020.....	64
Figura 39. Hidrociclón. Fuente: Bouso, 2020	65
Figura 40. Circuito de una planta de lavado. Fuente: Bouso, 2020	65
Figura 41. Criba. Fuente: Bouso, 2020	66

Figura 42. Cadena de suministro de las arenas silíceas. Fuente: Bonapace, 2016	68
Figura 43. Vista aérea de una operación minera de arenas silíceas en Wisconsin. Fuente: King, 2022.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tamaños de apuntes reconocidos internacionalmente y tamices de ensayo. ..	16
Cuadro 2. Datos de producción anual de arenas silíceas por provincia (en toneladas), desde 2008 a 2018. Fuente: Estadística Minera de la Secretaría de Política Minera de la Nación.....	22
Cuadro 3. Clasificación al 10% de rotura.....	30
Cuadro 4. Características de bandas ASTER.....	37
Cuadro 5. Fórmula aplicada para el Índice de Sílice.....	42
Cuadro 6. Tabla con resultados obtenidos a partir de la medición del Comando 'Analyse Particules'.....	50
Cuadro 7. Mediciones realizadas para una muestra de arenas Gold 8/16 (procedencia: Texas, USA).....	51
Circularidad	61
Cuadro 8. Estadísticas de circularidad para las muestras de arena estudiadas.....	61
Cuadro 9. Estadísticas de Redondez para las muestras de arena estudiadas.....	62

1. INTRODUCCIÓN

La fracturación hidráulica, comúnmente denominada "fracking", es una técnica de estimulación de pozos que ha revolucionado la industria de hidrocarburos, permitiendo la explotación de recursos no convencionales (Montgomery y Smith, 2010). Esta metodología consiste en la inyección de fluido a alta presión en formaciones rocosas de baja permeabilidad (Fig. 1), con el objetivo de crear fracturas y liberar hidrocarburos atrapados, superando la resistencia a la fractura de la roca y el esfuerzo (Economides y Nolte, 2000).

El fluido de fracturación se prepara mezclando en tanques especiales agua con apuntalantes (o agentes de sostén, entre ellos la arena frac) y aditivos químicos; su composición variará en función de las características de la formación. El fluido es inyectado en el pozo utilizando bombas de alta presión, ya que puede alcanzarse hasta 15000 psi (103 MPa) o más. El volumen de fluido varía de 10.000 a 50.000 m³ por pozo.

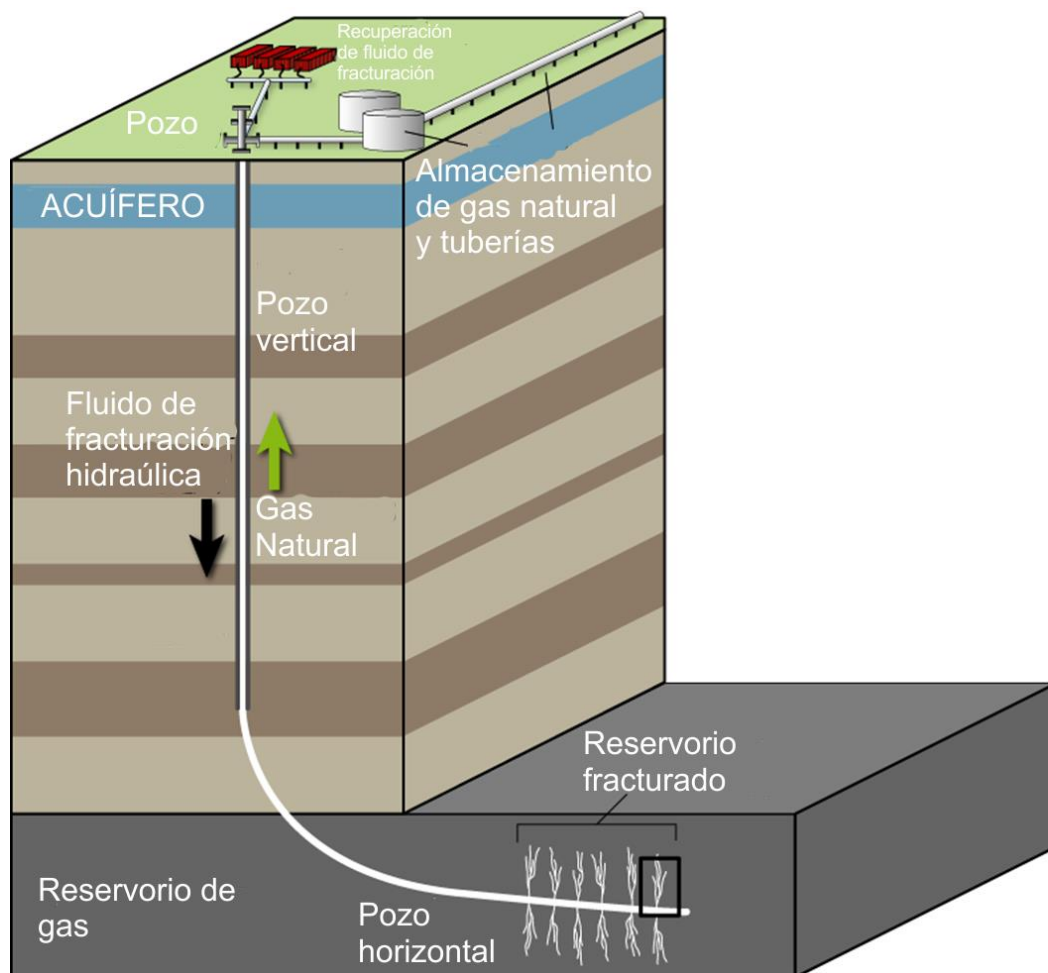


Figura 1. Ilustración esquemática de una operación de fracturación hidráulica y pozo horizontal. Fuente: (Fracturación hidráulica: una evaluación de Indiana | Servicio Geológico y del Agua de Indiana)

En Argentina el fracking se ha convertido en una herramienta clave para la producción de hidrocarburos, especialmente en la Formación Vaca Muerta de la Cuenca Neuquina, la segunda reserva no convencional de gas y la cuarta de petróleo del mundo; resulta una oportunidad

aprovechar la ventana de transición energética para explotarlos. El uso de arenas de calidad es esencial para garantizar la eficacia del proceso. La arena utilizada en el proceso de fracking son granos de cuarzo de alta pureza, con un tamaño de partícula uniforme y una forma redondeada. Estas características son determinantes para su aplicabilidad, debido a que permiten que la arena fluya libremente a través de las fracturas creadas en la roca, manteniendo las grietas abiertas y permitiendo que los hidrocarburos fluyan hacia el pozo.

Las arenas de fracking deben tener una resistencia adecuada para soportar la presión y el peso de las rocas sobre ellas. Además, la forma y el tamaño de los granos deben permitir que el fluido de fracturamiento fluya a través de ellas y hacia el pozo. Todas estas características se encuentran especificadas en la normativa API RP 56 del Instituto Americano del Petróleo, y la normativa de ensayos Internacional ISO 13503-2 con su correspondiente API RP 19C que recomienda las metodologías de los ensayos a aplicar para la determinación de las propiedades (American Petroleum Institute, 2008).

Los depósitos de arenas silíceas se encuentran ampliamente distribuidos en nuestro país, pero los que se explotan actualmente para uso como sostén se localizan principalmente en las provincias de Entre Ríos, Río Negro y Chubut. Las modalidades de la industria hidrocarburífera han impuesto el uso de materiales de altísima calidad, relegando las arenas de calidades intermedias. Sin embargo, el criterio de aprovechamiento racional de los recursos debe promover la investigación de arenas de calidades intermedias que puedan ser utilizadas en los mismos procesos, mediando un mixing adecuado y controlado entre calidades intermedias y superiores que no disminuya las propiedades del apuntalante (Belyadi et al., 2017).

En el mismo sentido, dado que los yacimientos o depósitos minerales a partir de los cuales la industria se provee de este material son arenas acumuladas a partir de procesos naturales múltiples, sólo en casos excepcionales (mediando procesos geológicos muy efectivos en la selección natural del mineral) contienen altas proporciones de arenas de alta calidad, en el volumen total del depósito. Usualmente, la obtención de materiales que cumplan con las especificaciones de resistencia, tamaño y forma, provoca que entre 30 a 60 % del volumen del yacimiento se descarte, conformado éste por impurezas y granos fuera de tamaño y/o especificación (C. Herrmann, com. pers).

Por los motivos que se exponen, resulta de sumo interés promover la prospección e investigación de distintos tipos de depósitos de arena, en diferentes ambientes geológicos de la Argentina, fundamentalmente los más cercanos a los sitios de demanda actual y potencial, que puedan constituir alternativas viables de provisión de arenas frac. En este sentido, son constituyentes principales de este TFI, y aportes al conocimiento, el desarrollo de herramientas tecnológicas como la teledetección o detección remota de arenas silíceas y la determinación automatizada de morfometrías de granos, así como la evaluación de su aplicabilidad.

La demanda potencial de las arenas de fracking en Argentina es muy alta, debido a la riqueza de la Formación Vaca Muerta y otras. La producción convencional de petróleo en 2022 fue de 19910 Mm³ y representa 58% del total producido, mostrando una tasa de disminución promedio anual del 4.6% en el periodo 2012-2022. En contraste, la producción no convencional, impulsada por el denominado “fracking oil”, creció durante todos los años de la última década hasta representar el 42% del total del petróleo producido en 2022. Creció a una tasa promedio anual

de 38.1% entre los años 2015 y 2022, año este último en el cual la producción fue 47.5% superior a la del año anterior (Rojo, 2023).

Vinculado a lo anterior, el beneficio de utilizar distintas fuentes de provisión de arenas, sin desmedro de su calidad, impactará positivamente en la logística de distribución y la dinámica de comercialización de este insumo imprescindible, como también se analiza en el TFI.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos principales de este trabajo final integrador son los siguientes:

- Describir las características de las arenas silíceas que definen su aptitud para uso en fracturamiento hidráulico.
- Presentar las situaciones actuales e históricas recientes del mercado global y nacional de arenas para fracking.
- Documentar y contextualizar la legislación minera aplicable a la explotación de estos depósitos, incluyendo las regulaciones ambientales.
- Analizar las particularidades de los ambientes geológicos de formación para acumular arenas con condiciones de uso en la industria.
- Presentar y proponer dos metodologías aplicadas a partir de desarrollos propios, para la detección remota de depósitos de arenas silíceas y para la caracterización morfométrica de las partículas de arena.
- Validar las metodologías propuestas, a partir de la comparación con depósitos de arena conocidos, y materiales comercialmente aceptados en el mercado global.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En una primera etapa, se llevó a cabo una revisión de la bibliografía existente sobre los diversos aspectos abordados en este Trabajo Final Integrador.

A continuación, se procesaron imágenes satelitales utilizando la Plataforma Google Earth Engine (Gorelick, 2017). Para ello, se desarrolló una secuencia de comandos o script en lenguaje Javascript, lo que permitió generar el índice de Sílice a partir de imágenes ASTER (Ninomiya, 2004) para toda la Argentina continental. Este proceso tuvo como objetivo identificar arenas con potencial uso como apuntalante en la industria petrolera de las cuales se seleccionó un área en Rincón de los Sauces, en el que se contaba con muestras de arena y el análisis del índice de sílice dio valores positivos.

Posteriormente, se seleccionaron muestras de arena comercial estándar de Texas, Estados Unidos, utilizada en la industria petrolera, y muestras de arena de un sitio específico en Rincón de los Sauces, provincia de Neuquén. Estas muestras fueron fotografiadas con un microscopio estereoscópico Greenough, modelo Leica S8 APO, perteneciente al laboratorio del área de Recursos Minerales del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

A partir de las fotografías digitales obtenidas con el microscopio, se midieron los parámetros morfométricos de las arenas en sus distintas fracciones granulométricas utilizando el programa de código abierto Fiji (Schindelin et al., 2012). Este software permitió la clasificación semiautomática de cada grano de arena, extrayendo parámetros como la esfericidad y la redondez. Con estos datos, se realizó un análisis estadístico de las diferentes fracciones granulométricas y se elaboraron diagramas de Krumbein y Sloss (1951) para comparar las arenas analizadas.

Finalmente, se realizó un análisis que permitió la validación de la percepción remota (teledetección) a partir de comparaciones con datos de gabinete (mapas geológicos) y de terreno (reconocimiento de depósitos de arena sílicea).

4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARENAS DE FRACTURACIÓN

4.1. Definición y tipos de materiales

Un agente de sostén es un material granular que se añade al fluido de fracturación para abrir la formación fracturada y promover el flujo de hidrocarburos durante la vida productiva del pozo (Beckwith, 2011). Comúnmente estos materiales son denominados apuntalantes.

Los materiales apuntalantes más importantes se pueden agrupar en tres categorías principales, basados en su conductividad (Gallagher, 2011):

- Arenas síliceas
- Arenas recubiertas con resina
- Materiales cerámicos

La jerarquía de los apuntalantes se basa en su conductividad; la cerámica es la de Nivel 1 y la de mayor conductividad, le sigue la arena recubierta de resina en el Nivel 2 y, finalmente, la arena sin recubrimiento en el Nivel 3 (Fig. 2). Un rango jerárquico más alto en la pirámide indica también mayor costo. En el mercado actual de apuntalantes las arenas síliceas siguen dominando, debido a su abundancia en la naturaleza. Sin embargo, la demanda de apuntalantes recubiertos de cerámica y resina está aumentando debido a las necesidades de materiales con mayor resistencia para su uso en pozos más profundos.

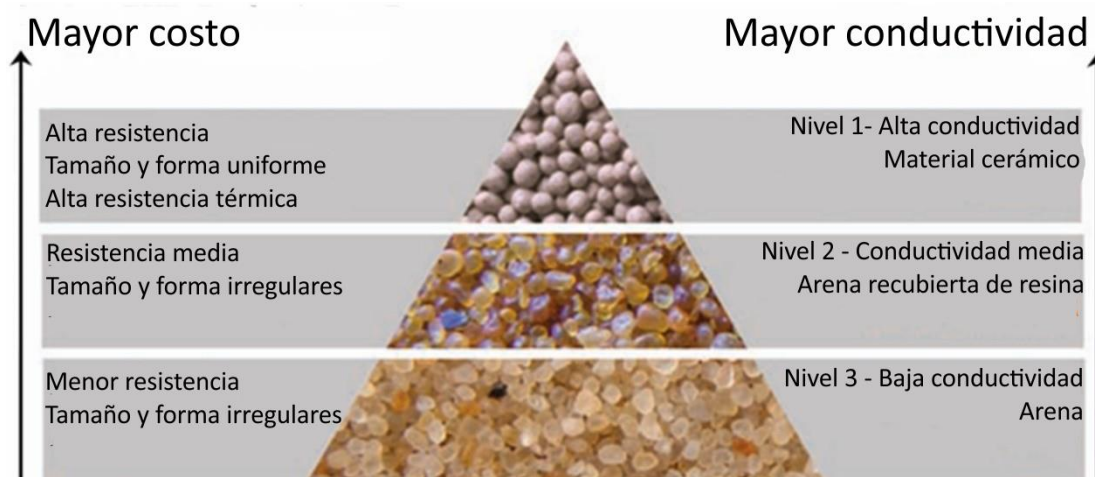


Figura 2. Tipos de materiales apuntalantes y su relación en conductividad, costo y producción, modificado de Gallagher (2011).

4.1.1. Arenas síliceas

Las arenas síliceas son, por definición, arenas con alto contenido de sílice, procesadas y clasificadas (Celeda y Mari, 1994). Se mantienen como el agente de sostén más utilizado mundialmente para el proceso de fracturación hidráulica debido a su menor costo con respecto a los otros materiales apuntalantes.

Luego de su extracción, la arena se somete a un procesamiento posterior, que incluye como mínimo el lavado/limpieza, el secado y el dimensionamiento de los granos de arena. Los estándares aplicados a la selección de arenas como apuntalantes, fundamentalmente los americanos, las clasifican en dos tipos principales: arena blanca y arena marrón (Benson y

Wilson, 2015). La arena marrón contiene un porcentaje más bajo de sílice que la arena blanca, su color se debe al mayor contenido de impurezas.

Las especificaciones de las arenas de fractura incluyen varios criterios: mineralogía (alto contenido de sílice), rango de tamaño de grano de medio a grueso, esfericidad y redondez de 0.6 o más, alta resistencia al aplastamiento, baja solubilidad, baja turbidez y buena friabilidad (Herrmann y Gozálvez, 2016). El detalle se observa en 3.2.

4.1.2. Arenas recubiertas con resina

Las arenas recubiertas con resina (RCS) han sido un pilar de los tratamientos de estimulación durante más de 40 años, debido principalmente a su capacidad para formar un paquete dentro de las fracturas, evitando así que los agentes de apuntalamiento fluyan de regreso al pozo durante la fracturación y la producción. A menudo se prefiere cuando se requiere mayor resistencia a la compresión para evitar el aplastamiento en áreas de presión extrema en profundidad, ya que es más resistente que la arena sin recubrir.

Hay dos tipos de RCS: curables y precurados. La resina curable reacciona químicamente a otras partículas de resina y fluidos de fracturación. Esta capacidad permite que la resina se una con otros productos químicos y partículas para evitar que los fluidos fluyan de regreso al pozo donde pueden dañar el equipo de producción; por ello la resina curable es el RCS más utilizado.

La resina precurada ya está completamente curada cuando se introduce en la zona de fracturación; se prefiere su uso si por ello mejora la interacción con otras partículas y productos químicos dentro de la fractura; además tiene muy alta resistencia al aplastamiento.

4.1.3. Materiales cerámicos

Los apuntalantes cerámicos son otro tipo de apuntalante artificial que a menudo se elige por su resistencia superior a las altas presiones de formaciones más profundas. La mayoría de los apuntalantes cerámicos se fabrican a partir de bauxita en polvo o arcilla de caolín, horneadas a temperaturas muy altas. Las cuentas hechas de bauxita son el tipo de cerámica más utilizado.

Las perlas de cerámica sinterizada de alta densidad pueden soportar presiones más altas que la arena o las arenas cubiertas de resina, aunque tiene algunas desventajas. Por un lado, el costo de la cerámica es superior en comparación con otros apuntalantes, y el costo de implementarlos también puede ser más elevado. Sin embargo, una de las principales ventajas de estos apuntalantes fabricados es la amplia selección de tamaños de grano y gravedades específicas en comparación con una arena de fractura natural. La cerámica se puede adaptar idealmente a la viscosidad del fluido de fracturación hidráulica y al tamaño de las fracturas que se espera que se desarrollen en la roca. Además, los apuntalantes cerámicos son más uniformes en tamaño y redondez y tienen composición más homogénea, lo que proporciona mayor conductividad.

4.2. Especificaciones técnicas

Las especificaciones para la arena de fractura se basan en las normas para apuntalantes determinadas por el American Petroleum Institute (API) y la Organización Internacional de Normalización (ISO). Las normas actuales API/ISO se definen en la API RP 19C/ISO 13503-2, "Práctica recomendada para la medición de las propiedades de los apuntalantes utilizados en

operaciones de fracturación hidráulica y empaque de grava", que sustituye a la RP 56 y a la RP 58 (American Petroleum Institute, 2008).

La norma dicta los procedimientos de prueba estándar utilizados para evaluar y comparar ciertas propiedades físicas de los agentes de apuntalamiento utilizados en las prácticas que se describieron más arriba. Estos estándares de arena de fractura se modelaron a partir de las propiedades de la arena "Ottawa" o arena "Northern White" (Fig. 3) y la arena "Brady Brown" (Zdunczyk, 2014). La arena de Ottawa, llamada así a la extraída de la arenisca de San Pedro en Ottawa, Illinois, es utilizada como estándar por la Sociedad Americana de Materiales de Ensayo (ASTM).

Las especificaciones de la arena de fractura incluyen criterios de mineralogía (alto porcentaje de contenido de sílice), rango de tamaño de grano de medio a grueso, esfericidad y redondez de 0,6 o más, alta resistencia al aplastamiento, baja solubilidad, baja turbidez y buena friabilidad (American Petroleum Institute, 2008).

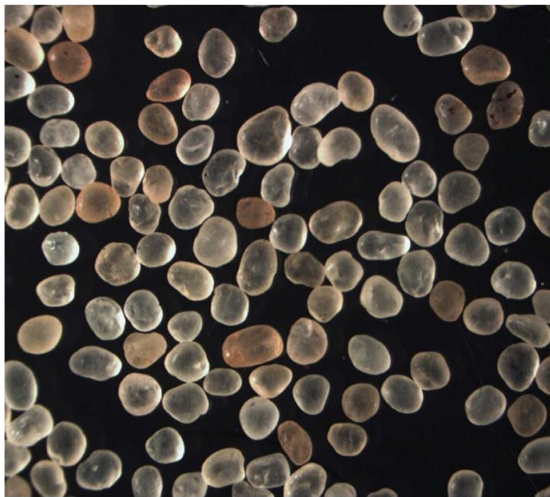


Figura 3. Imagen de muestra ampliada de arena de fractura "Northern White"(Northern White Frac Sands, U.S. Geological Survey, usgs.gov).

La norma Api 19 C provee procedimientos estándares de ensayo y determina qué parámetros físicos y químicos deben cumplir los agentes de sostén (sean arenas, arenas resinadas, cerámicos o bauxitas) para ser usados en fracturas hidráulicas. Esta norma reemplaza a las siguientes normas:

NORMA API RP 56: Práctica recomendada para el ensayo de arena usada en operaciones de fracturación hidráulica.

NORMA API RP 58: Práctica recomendada para el ensayo de arena usada en operaciones de Gravel Packing.

NORMA API RP 60: Práctica recomendada para el ensayo de agentes de sostén de alta resistencia usada en operaciones de fracturación.

Estas especificaciones son:

- Procedimiento de muestreo
- Tamaño de grano y distribución granulométrica

- Redondez y esfericidad
- Densidad Bulk
- Solubilidad en Ácido
- Turbidez
- Resistencia a la compresión
- Perdida por ignición

4.2.1. Procedimiento de muestreo

La norma establece tomar una muestra por cada 9.000 kg (20.000 lb), o fracción menor de la misma. Se obtendrá un máximo de 10 muestras por contenedor a granel, las cuales serán combinadas y ensayadas. Los principales muestreos se realizan sobre vagones de tren o camiones, sobre bolsas (98 lb) o bolsones (3.300 lb). Además, todas las muestras serán obtenidas de una corriente de circulación con un muestreador automático o manual.

El dispositivo de muestreo será utilizado con su longitud perpendicular a la corriente de circulación del agente de sostén. Este será pasado a una velocidad uniforme de lado a lado a través de todo el ancho de corriente del agente de sostén en movimiento.

4.2.2. Tamaño de grano y distribución granulométrica

La norma establece 8 tamaños diferentes de arenas, generalmente denominados por los tamices ASTM superior e inferior entre los cuales debe quedar retenido el 90 % de las arenas. Los tamices estándar ASTM son un conjunto de tamices de ensayo normalizados que se utilizan para el análisis granulométrico en diversas industrias. Estos tamices están definidos y clasificados por las normas ASTM E11 e ISO 3310-1, que describen los métodos para su verificación y precisión.

La Norma API 19C fija además los 6 tamices con los que debe realizarse el ensayo granulométrico de cada tipo; establece que solamente es admisible un 0.1 % de partículas retenidas en el tamiz superior y un máximo de 1% de partículas pasantes por el tamiz inferior, de los que indica el ensayo. El Cuadro 1 refleja los 8 tipos considerados normales, aunque luego en la práctica se acepta el empleo de otras granulometrías.

Cuadro 1. Tamaños de apuntalantes reconocidos internacionalmente y tamices de ensayo.

Arenas	MALLAS ASTM – mm								
	6/12 3.36/1.6 9	8/16 1.19/2.3 8	12/20 0.84/1.6 8	16/30 0.60/1.1 9	20/40 0.84/0.4 2	30/50 0.30/0.6 0	40/70 0.21/0.4 2	70/140 0.10/0.2 1	
Tamices ASTM necesari os para el ensayo granulo-	4	6	8	12	16	20	30	50	Máx . 0.1 %
	6	8	12	16	20	30	40	70	
	8	12	16	20	30	40	50	100	
	10	14	18	25	35	45	60	120	

métrico	12	16	20	30	40	50	70	140	
	16	20	30	40	50	70	100	200	
	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Máx .1 %

4.2.3. Redondez y esfericidad

Estas dos propiedades son factores que influyen en el empaquetamiento y en la capacidad de transporte del apuntalante. La redondez es la medición relativa de la agudeza de las esquinas de los granos o la curvatura de dichos granos. La esfericidad es la medición de la aproximación de la forma de una partícula respecto de la forma de una esfera.

La determinación de estas características se realiza generalmente de forma manual, mediante la observación al microscopio de un determinado número de granos, usualmente 20 o más, y comparando su forma con la establecida en un cuadro desarrollado por Krumbein y Sloss (1951) (Fig. 4). La norma es abierta a distintas metodologías de mediciones; en este TFI se presenta un desarrollo a partir de imágenes digitales tomadas en microscopio.

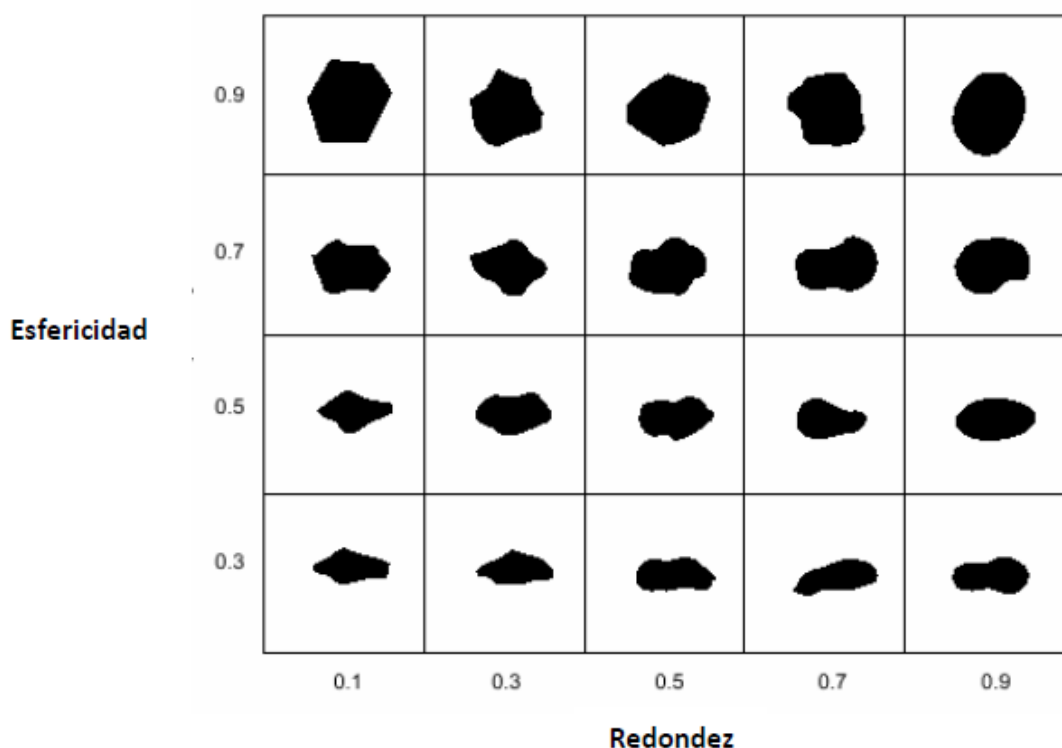


Figura 4. Cuadro de Krumbein y Sloss (1951) utilizado para medición de parámetros de esfericidad y redondez en granos de arena.

La norma recomienda valores de esfericidad y redondez mayores a 0,6 en la escala mencionada, mientras que para las arenas cubiertas con resinas los límites propuestos son mayores a 0,7.

4.2.4. Densidad bulk

La densidad bulk se refiere a la masa del agente de sostén que llena un volumen unitario incluyendo al agente de sostén y a su porosidad. Se utiliza para determinar la masa del agente de sostén necesaria para llenar una fractura y un silo de almacenamiento. La recomendación máxima del API es de 105 [lb/ft³] o 8.55 [g/cc].

4.2.5. Solubilidad en ácido

Este procedimiento permite determinar la concentración de elementos solubles en ácido que contaminan al agente de sostén, generalmente más blandos, y que al recibir el esfuerzo del cierre de la fractura se rompen y migran dentro del sistema poral artificial creado, originando pérdidas de conductividad. La norma específica que el ensayo consiste en usar una solución 12:3 HCl:HF (12% de masa de HCl y 3% de masa de HF). El API recomienda un máximo para arena del 2%, mientras que para arenas cubiertas con resinas el límite de solubilidad es del 7%.

4.2.6. Turbidez

El objetivo de este ensayo es determinar la cantidad de partículas finas en suspensión. La finalidad de estimar los elementos blandos que posee el agente de sostén se debe a que en presencia de agua pueden crear finos en suspensión y taponar el sistema poral de la fractura. Para la determinación se realizan mediciones de la dispersión y absorción de luz por las partículas suspendidas en el líquido. Cuanto mayor sea el número de este índice, más partículas en suspensión estarán presentes. Los resultados se expresan en FTU (Formazin Turbidity Unit / Unidades de Turbidez de Formazina) y/o NTU (Nephelometric Turbidity Unit / Unidades Nefelométricas de Turbidez). El API recomienda un límite máximo de 250 unidades de turbidez.

4.2.7. Resistencia a la compresión

Este ensayo evalúa la calidad del agente de sostén en función de la cantidad porcentual que se rompe cuando es sometido a una presión de confinamiento. Para esto, la muestra tamizada es colocada dentro de un pistón y sometida a diferentes cargas, midiéndose los porcentajes de rotura que pasan por el tamiz más fino de la malla seleccionada. La rotura es un efecto indeseable en estos materiales. El grado de rotura depende del esfuerzo aplicado, del tipo y la geometría del apuntalante, de la superficie de contacto y de la granulometría. Es útil para determinar y comparar la resistencia a la rotura de distintos agentes de sostén. El análisis de los resultados obtenidos proporciona indicaciones sobre el esfuerzo máximo que puede absorber o soportar un agente de sostén cuando este se encuentre confinado en la fractura del pozo. La norma recomienda que los límites máximos para arena sean:

- Para tamaño de malla 12/20 – 16 % a 3000 psi
- Para tamaño de malla 20/40 – 14 % a 4000 psi

Mientras que los límites máximos para apuntalantes de alta resistencia sean:

- Para tamaño de malla 12/20 -25 % a 7500 psi
- Para tamaño de malla 16/20 -25% a 10000 psi
- Para tamaño de malla 20/40 – 10 % a 12500 psi
- Para tamaño de malla 40/70 – 8% a 15000 psi

4.2.8. Pérdida por ignición (LOI)

Este ensayo permite determinar la cantidad de materiales orgánicos presentes en la mezcla de arena por medio de la medición de peso antes y después de someter a la mezcla de arena a ignición. La norma establece que para realizar el ensayo de LOI se requiere crisoles normalizados, un horno o mufla y un desecador adecuado para albergar a los crisoles. El cálculo de LOI se expresa en porcentaje utilizando la siguiente ecuación:

$$LOI = 100 \times (m_i - m_f) / (m_i - m_t)$$

Donde:

m_i es la masa inicial de la muestra mas el crisol y la tapa, expresada en gramos}

m_t es la masa original del crisol y la tapa, expresada en gramos.

m_f es el peso final de la muestra tratada térmicamente, el crisol y la tapa, expresada en gramos.

5. MERCADOS

5.1. Mercado Global

A nivel global, el mercado de arenas de fractura experimentó un crecimiento muy significativo en las últimas décadas, impulsado por el auge de la producción de hidrocarburos no convencionales. En 2017 la demanda total de arena sílicea fue de 276 millones de toneladas (Fig. 5), siendo las arenas de fracturación el 41% del total de la demanda, el 25% para la industria del vidrio, el 21 en fundiciones y un 13% en otros usos que incluyen la industria química y su uso como relleno (CRU Consulting, 2018). A su vez, los cinco principales productores de arena sílicea fueron Estados Unidos con una participación aproximada de 45%, seguido de China con un 20%, y luego de países con mercados menores, como Alemania, Canadá y Japón (UPME, 2018).

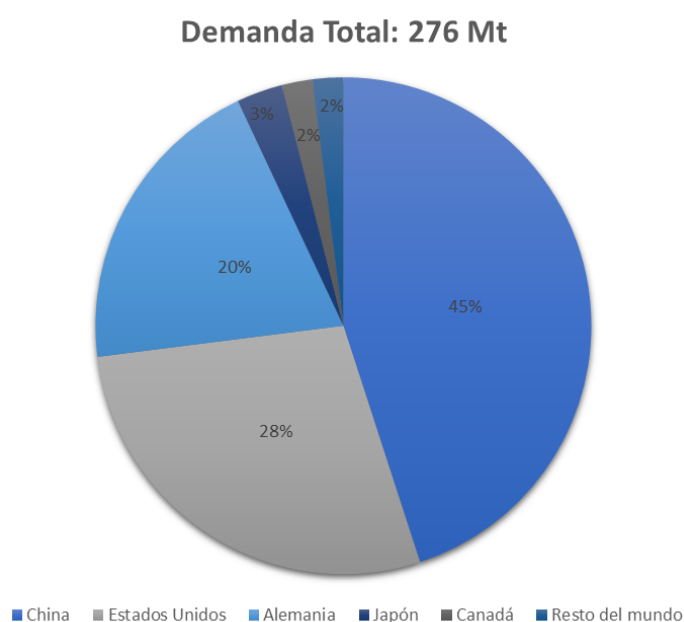


Figura 5. Mercado global. Consumo de arenas síliceas por país (fuente UPME, 2018)

Para tomar un patrón de comparación en la década anterior, en 2008 la demanda global de arenas de fracturación apenas alcanzaba 10 Mt.

Un factor importante a considerar en la demanda la demanda de arenas de fracturación es el precio del petróleo. Por ejemplo, en 2015 la demanda disminuyó 9% debido a la caída global en los precios del petróleo. Las empresas petroleras disminuyeron y hasta suprimieron sus gastos de exploración y se enfocaron en la extracción convencional, mientras los precios se mantuvieron deprimidos, lo que resultó en una reducción en la actividad de *fracking*. Sin embargo, en años posteriores se utilizó más arenas de fracturación para mejorar la productividad de los pozos existentes, y esta tendencia de crecimiento se mantuvo en 2016 y 2017 a pesar de que los precios del petróleo se mantuvieron por debajo de los máximos de 2011-14, mientras en EEUU se mantuvieron enfocados en el *fracking* (UPME, 2018).

En 2017 la demanda ya había crecido a una tasa de crecimiento anual compuesto del 31,3%, alcanzando un total aproximado de 113 Mt. Esto se logró principalmente en EEUU, que

representó un 86% del crecimiento en la demanda. El mercado canadiense también creció en alrededor de 5 Mt, con adiciones muy pequeñas de otros mercados (UPME, 2018).

En 2020 el mercado estaba valuado en aproximadamente USD 7.800 millones, con una proyección a 12.100 millones de dólares en 2025, lo que reflejaría una tasa de crecimiento anual compuesta de 9.1% (Markets y Markets, 2022). Este crecimiento se ve impulsado principalmente por la creciente demanda de gas natural y la expansión de la producción de *fracking* gas en Estados Unidos, que impulsa significativamente la demanda de apuntalantes, entre los que se incluyen las arenas síliceas.

La oferta del mercado se caracteriza por una amplia gama de productos, siendo las arenas síliceas el tipo de más rápido crecimiento debido a su favorable relación costo-efectividad, especialmente durante los períodos de disminución de los precios del petróleo. Además, los avances tecnológicos en la tecnología de fracturación y las nuevas técnicas de perforación están mejorando la eficiencia del uso de los apuntalantes, estimulando aún más la demanda (Sierra et al., 2023). Los apuntalantes cerámicos están ganando una porción de mercado debido a su mayor resistencia al aplastamiento en comparación con la arena frac tradicional, haciéndolos adecuados para aplicaciones más exigentes (Xiaohong et al., 2023). No obstante, la preferencia por las arenas síliceas sigue siendo elevada, particularmente en entornos sensibles al costo, lo que indica un panorama competitivo entre estos dos tipos de apuntalantes.

El pronóstico para el mercado del quinquenio 2022 a 2027 indica una tasa de crecimiento sostenido de alrededor del 9% sostenido por las actividades de exploración de petróleo y gas en curso (Presley, 2023).

5.2. MERCADO NACIONAL

El acelerado desarrollo de las operaciones de extracción de hidrocarburos en la Formación Vaca Muerta que recibe gran inversión extranjera y local desde hace menos de una década, se refleja en un crecimiento sustancial de la demanda de arenas síliceas. La explotación comercial de *fracking oil* y *fracking gas* de la Cuenca Neuquina comenzó en 2013 por las empresas Chevron e YPF. Se proyecta que el crecimiento en la demanda de arenas de fracturación en Argentina sea de 5,8% (tasa de crecimiento anual) para 2035 (UPME, 2018).

5.2.1. Características de la oferta y demanda

La oferta de arenas síliceas de fractura en Argentina proviene tanto de la producción nacional como de importaciones. La producción nacional se concentra principalmente en las provincias de Entre Ríos, Chubut y Río Negro.

La producción de arenas síliceas del año 2018 en el país fue 1,47 Mt (Cuadro 2). Hasta esa fecha registra un aumento de 2,3 veces la producción de 2013, coincidente con el aumento de operaciones de hidrocarburos no convencionales, tanto de gas como de petróleo, en Neuquén. La demanda está impulsada principalmente por la actividad de fracturación hidráulica en Vaca Muerta. De acuerdo con informes de la Secretaría de Energía de Argentina, la producción de petróleo no convencional en Vaca Muerta ha aumentado de manera constante, pasando de aproximadamente 50.000 barriles por día en 2015 a más de 200.000 barriles por día en 2022. Esta expansión ha generado una necesidad persistente de arenas de fractura, cuyo gasto

constituye el 3% del gasto total por pozo no convencional en el escenario del gas en areniscas compactas de muy baja permeabilidad (tigh), y el 8% y el 9% en los contextos del gas de esquisto bituminoso y el petróleo de esquisto bituminoso, respectivamente (Romero et al., 2017).

Las principales empresas consumidoras son YPF, que lidera la actividad en Vaca Muerta, seguida por otras operadoras como Pan American Energy, Tecpetrol y Pluspetrol. La demanda se caracteriza por requerimientos específicos en términos de calidad, con especificaciones que incluyen alta resistencia a la compresión, esfericidad y tamaño de grano uniforme, como se describió en otro capítulo de este Trabajo.

5.2.2. Producción histórica

La producción de arenas silíceas en Argentina tiene una larga historia, pero su uso específico para fracturación hidráulica es relativamente reciente, coincidiendo, como se comentó, con el desarrollo de Vaca Muerta.

A partir de 2016 comienza a ser significativa la producción de la provincia de Chubut, al incrementar 5 veces aproximadamente la producción del año anterior (Menga y Solsona, 2019).

El último registro oficial de la producción total de arenas silíceas en Argentina fue 1,469 Mt (dato para 2018); significa un incremento de 175 % con respecto a 2010. Se destaca la creciente participación de producción nacional desde ese año hasta la actualidad (Cuadro 2 y Fig. 6).

Cuadro 2. Datos de producción anual de arenas silíceas por provincia (en toneladas), desde 2008 a 2018. Fuente: Estadística Minera de la Secretaría de Política Minera de la Nación.

Año	Chubut	Entre Ríos	Jujuy	Mendoza	Río Negro	Total País
2008	39.069	426.925	917	300	5400	472.611
2009	37.417	320.171	245	324	6.000	364.157
2010	38.130	485.376	0	350	7000	530.856
2011	41.913	468.886	75	298	5600	516.772
2012	14.995	599.828	144	289	0	615.256
2013	11.881	643.178	1140		3.500	659.699
2014	11.007	659.096			3150	673.253
2015	23.733	1.070.823			3500	1.098.056
2016	139.596	805.717			4.000	949.313
2017	289.034	845.150			2.556	1.136.740
2018	460.140	1.009.662				1.469.802

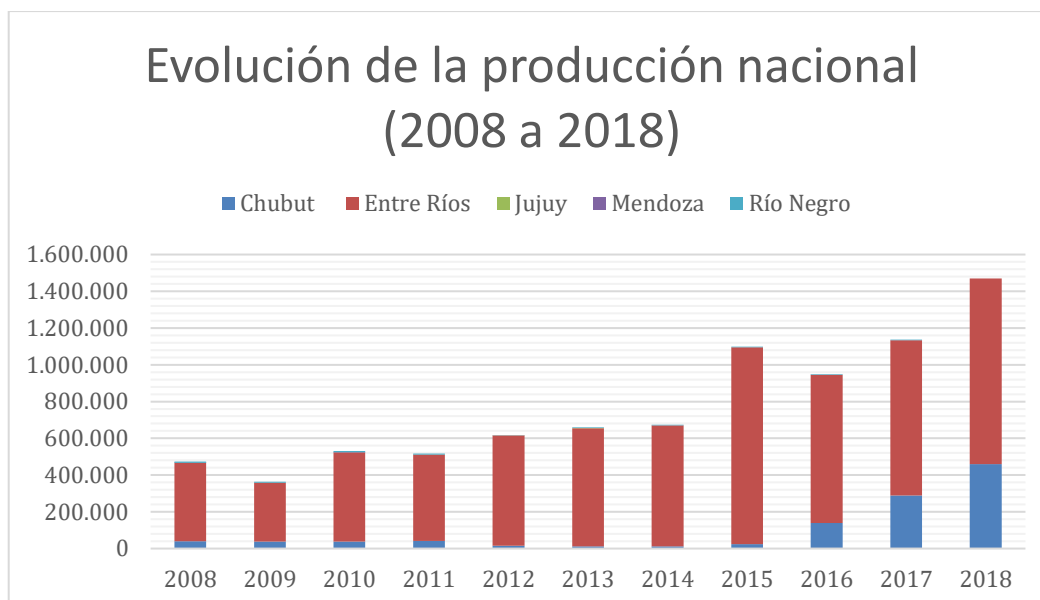


Figura 6. Evolución de producción de arenas síliceas por provincia desde 2008 a 2018 (en toneladas por año). Fuente: Estadística Minera de la Secretaría de Política Minera de la Nación.

Si bien no hay datos estadísticos oficiales posteriores a 2018, es posible comentar algunos datos aislados que demuestran que la tanto la capacidad instalada como la producción se incrementaron por inversiones en tecnología y mejoras en los procesos de extracción y procesamiento. Por ejemplo, la empresa Arenas Patagónicas S.A., ubicada en la provincia de Río Negro, ha reportado un aumento significativo en su capacidad de producción, pasando de 40.000 toneladas anuales en 2015 a más de 300.000 toneladas en 2022 (un incremento de 750 %).

Por otra parte, durante 2023 se realizaron 14000 etapas de fractura en pozos (Mejor Energía, 2024). Considerando que en cada etapa de fractura se inyectan entre 200 y 300 t de arena (Mas Energía, 2024), resulta que se utilizaron al menos 2.800.000 toneladas de arenas síliceas. Este dato duplica la producción registrada en 2018.

5.2.3. Consumo aparente, importación y exportación

Como se mencionó, el consumo aparente de arenas de fractura en Argentina es impulsado principalmente por la demanda interna de la industria no convencional de hidrocarburos.

A partir de la puesta en marcha de la explotación de hidrocarburos no convencional la participación de la importación de arena (Fig. 7) para la industria petrolera y de servicios petroleros, respecto de otras industrias, ha crecido desde un 46% en 2010, hasta un 93% en 2018 (Menga y Solsona, 2019)

Actualmente, la producción local de arenas de sílice es significativa, y el mercado se caracteriza por un nivel relativamente bajo de comercio exterior en la actualidad, lo que indica que la mayor parte del consumo se satisface a través de fuentes nacionales.

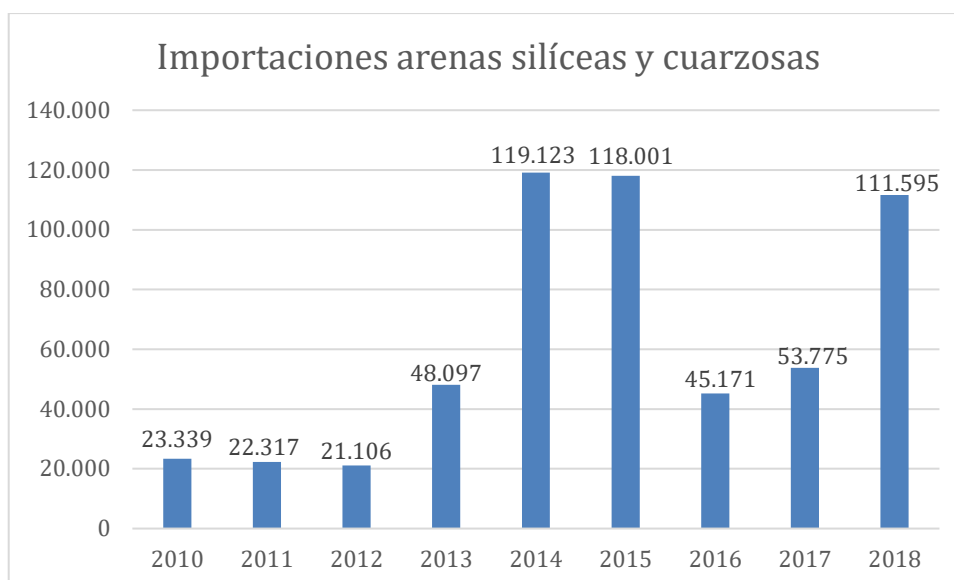


Figura 7. Gráfico de Importaciones de arenas silíceas y cuarzosas del período entre 2010 y 2018. Fuente secretaría de Minería de la Nación

La exportación de arena de fractura desde Argentina es mínima, con solo 1.800 toneladas exportadas en 2018. Esto representa menos del 1% del total de las importaciones, lo que indica que el mercado externo para la arena de fractura argentina es muy limitado. Los principales destinos de estas exportaciones son países vecinos como Paraguay, Uruguay, Bolivia y Chile, siendo el transporte por camión el método preferido para estos envíos (Menga y Solsona, 2019).

5.2.4. Política arancelaria

Argentina ha implementado una política tarifaria que afecta la importación de arenas de fractura. Las tarifas arancelarias específicas pueden variar en función del tipo de arena y su uso previsto, pero en general la medida tiene como objetivo proteger la producción local mientras regula el ingreso de arenas importadas de alta calidad, lo que puede ayudar a estimular las economías locales y reducir la dependencia de materiales extranjeros (Menga y Solsona, 2019).

Si bien los aranceles apuntan a proteger la producción local, la mínima actividad exportadora sugiere que los productores locales enfrentan desafíos para competir con arenas importadas de mayor calidad. Esta dinámica plantea cuestionamientos sobre la sustentabilidad a largo plazo de la industria local bajo el actual régimen tarifario (Menga y Solsona, 2019).

5.2.5. Legislación minera aplicable

La actividad minera en Argentina está regulada principalmente por el Código de Minería y leyes complementarias. En el caso específico de las arenas silíceas, su extracción está sujeta a la legislación minera general, así como también a regulaciones ambientales específicas.

La Ley Nacional 24.585 de Protección Ambiental para la Actividad Minera establece los requisitos para la evaluación de impacto ambiental y la gestión sostenible de los recursos mineros, incluyendo las arenas silíceas. Además, cada provincia tiene la facultad de establecer regulaciones adicionales para la actividad minera en su territorio; como análisis de tema se muestra la legislación vigente para la provincia productora Entre Ríos.

En materia minera, la ley que da inicio a toda la legislación entrerriana es la ley 5.005 que reglamentó las bases y clasificación de los materiales no metalíferos; y la ley 8.559 que creaba el fondo especial para fomento y contralor minero (luego derogada).

La Ley 8.850 regula la adhesión de la provincia de Entre Ríos a leyes y decretos nacionales que establecen la desregulación de diversas restricciones a las actividades mineras y establece regímenes promocionales para las inversiones en el sector (leyes 24196; 24224; 24228; decretos 815 y 816-92).

La Ley 10158 crea el Registro Único de Actividades Mineras, establece definiciones y trámites que deben realizar los productores y las plantas de beneficio para poder funcionar y los deberes de la autoridad de aplicación. También crea el Fondo Minero de Entre Ríos; el procedimiento para requerir un permiso de exploración, explotación de yacimientos de sustancias minerales situadas en el dominio público o privado del Estado. Asimismo, establece las normas relativas a las planillas de producción, la guía de tránsito de minerales y las normas de protección ambiental. Finalmente, se establecen las infracciones y las sanciones para el caso de incumplimiento de los deberes establecidos en la norma.

En cuando a la reglamentación específica, el decreto reglamentario 4067/2014 establece el procedimiento para obtener el permiso de explotación:

- ARTÍCULO 9º.- La solicitud para obtener el permiso de explotación se dirigirá a la DIRECCIÓN DE MINERÍA u Organismo que en el futuro la remplazare, quien deberá determinar si se han cumplido con todos los requisitos para el otorgamiento del respectivo permiso. Verificado el cumplimiento de los mismos procederá a redactar la Resolución por la cual se otorga el respectivo permiso, el que tendrá un plazo de vigencia de DOS (2) años, ésta deberá ser remitida al Ministerio de Producción a los efectos del ratificarlo mediante el dictado la Resolución Ministerial que así lo disponga. Una vez refrendada y previa acreditación de pago del respectivo derecho por parte del productor se le otorgara copia de la Resolución por la cual se le otorga el permiso definitivo.
- ARTÍCULO 10º.- Determinase que la Autoridad de aplicación podrá otorgar permisos provisorios, por el término de SEIS (6) meses, para aquellos interesados en la explotación de arena, cuando hayan cumplimentado todos los requisitos legales, con excepción de la Declaratoria Nacional, que deberá estar en trámite. El productor (“de arenas de lecho”) para hacerse acreedor de este permiso deberá presentar certificado actualizado de la Dirección Nacional de Vías Navegables de la Nación en el que conste que el solicitante ha cumplido en tiempo y forma con la presentación de todos los requisitos legales exigidos para su obtención. Además, contiene anexos, a saber: la guía de tránsito, las planillas de permiso de extracción y de movimientos, etc.

Por otro lado, quienes extraen minerales en la provincia deben abonar un “Derecho de Extracción de Minerales”, según informa la Administración Tributaria de Entre Ríos, “por la extracción de arcillas, arena para construcción, arena sílicea, caliza, canto rodado, conchilla, piedras partidas, areniscas, toscas, pedregullo calcáreo, yeso y toda otra sustancia mineral fuera del ejido municipal pagará por los derechos de extracción que fije la Ley Impositiva. Toda Persona física o jurídica que interese explotar yacimientos minerales de tercera categoría del dominio público o privado del Estado, deberá solicitar el respectivo permiso el que estará sujeto

al pago de los derechos de otorgamiento y de explotación que fija la Ley vigente. A partir de la sanción de la Ley 10158, se designó a la Dirección General de Minería de la Provincia, como autoridad de aplicación y quien fija los valores, mientras que la Administración tributaria de la provincia recauda la tasa”.

Regulación ambiental:

La evaluación de impacto ambiental (EIA), instrumento de política ambiental receptado en los artículos 11, 12 y 13 de la ley general del ambiente 25.675, en la provincia de Entre Ríos se encuentra reglamentado en el decreto 4977/09 y su modificatorio 3498/16. Su principal objetivo es prevenir que obras o actividades provoquen daños significativos a los ecosistemas y/o en la salud y calidad de vida de las poblaciones. Por esa razón requiere que el acceso a la información, la evaluación por autoridades y por las comunidades, a través de la participación ciudadana, debe llevarse a cabo necesariamente de manera previa al comienzo de ejecución de actividades.

Los decretos mencionados establecen que:

- “Ningún emprendimiento o actividad que requiera de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) podrá iniciarse hasta tener el mismo aprobado, por la Autoridad de Aplicación” (art. 2, decreto 4977/09)
- “Quienes pretendan desarrollar actividades encuadradas como Categorías 2 ó 3 deberán tramitar y obtener el CERTIFICADO DE APTITUD AMBIENTAL, para su funcionamiento” (art. 23 decreto 4977/09)
- “Prohíbase el inicio de la ejecución de los proyectos hasta que los mismos cuenten con todas las habilitaciones, permisos, certificaciones, autorizaciones, y los certificados ambientales emitidos por cada una de las autoridades de aplicación creadas en las respectivas leyes especiales” (art. 9 decreto 3498/16). Es decir, no es factible que se comience a producir o desarrollar determinada actividad, sin haber obtenido de manera previa el certificado de aptitud ambiental; o se continúe, luego de vencido el mismo. El anexo 6 del Decreto 4977/09 indica que la actividad de extracción de arenas silíceas califica como estándar 2 (actividades 141.3), es decir, de mediano impacto ambiental; con lo cual, las empresas deberán presentar Estudio de Impacto Ambiental y el cuerpo técnico de la Secretaría de Ambiente analizarla y evaluarla y, según artículo 21, emitir finalmente una Resolución “en la que manifieste taxativamente la Aprobación o No Aprobación del Estudio de Impacto Ambiental, con las consideraciones que crea conveniente aportar”. Luego que el proceso de evaluación de impacto ambiental, en su faz técnica, concluya -con la aprobación o no del Estudio de Impacto Ambiental- como indica el artículo 22, las empresas pueden “continuar con el trámite de habilitación ante los organismos que correspondan”. Es decir, recién después se podrán solicitar las demás autorizaciones en las reparticiones provinciales. Específicamente, para las actividades mineras, la ley 10.158 establece que: “Los titulares de derechos mineros, previo al inicio de las actividades, deberán dar cumplimiento a los requisitos que en materia de protección ambiental establece el Título XIII, Sección Segunda del Código de Minería y Ley Nacional Nro. 24.585” (art. 40) e instituye la posibilidad de sancionar con la suspensión inmediata de la actividad y la comunicación a la autoridad competente “cuando se tuviere conocimiento de que se están realizando actividades mineras que puedan o estén causando daño a la salud o a la vida de las personas, al ambiente o a

bienes de terceros” (art. 41). También la S.A.E.R. ha dispuesto mediante resolución 2185 (2/09/2021), algunos otros requisitos más en el proceso de evaluación de impacto ambiental para la extracción de arenas, piedra caliza, yeso, canto rodado y triturados pétreos: en cuanto a la inclusión de información sobre la explotación, puntualmente; sobre los planes de cierre, pasivos ambientales, distancias mínimas para resguardar poblaciones y la estabilidad del ambiente, y sobre la preparación del terreno previa aprobación del Certificado de Aptitud Ambiental, exigiéndoles a los consultores y proponentes otorgar el acceso a la información generada en el marco de sus tramitaciones.

5.2.6. Licencia Social

La licencia social estatal para la extracción de arena utilizada en la fracturación hidráulica en Chubut, Río Negro, Neuquén y Entre Ríos refleja una compleja interacción entre la aceptación de la comunidad, los incentivos económicos y las preocupaciones ambientales. La licencia social para operar (LSO) es crucial para las empresas del sector de los recursos naturales, ya que influye en su capacidad de llevar a cabo sus operaciones sin una oposición significativa.

Los beneficios económicos de la extracción de arena pueden mejorar el apoyo de la comunidad, como se ha visto en Neuquén, donde los gobiernos locales pueden priorizar el crecimiento económico por encima de las preocupaciones ambientales (Christel y Novas, 2018).

Por el contrario, en Entre Ríos, ha surgido una fuerte resistencia comunitaria debido al temor a la degradación ambiental por la explotación de arenas silíceas para su uso como apuntalante (Christel y Novas, 2018).

La consulta efectiva de las partes interesadas es vital para mantener una licencia social. Las empresas que colaboran con las comunidades locales y abordan sus preocupaciones tienden a experimentar menos conflictos (Dumbrell et al., 2021).

La ausencia de protestas públicas y una cobertura mediática mínima también pueden facilitar las operaciones, ya que las comunidades sienten que sus voces son escuchadas (Dumbrell et al., 2021).

El entorno regulatorio varía significativamente de una provincia a otra, lo que influye en la dinámica de las licencias sociales. En las regiones con estructuras de gobierno y derechos de propiedad bien definidos, es posible que a las empresas les resulte más fácil obtener una licencia social (Dumbrell et al., 2021).

El establecimiento de marcos para supervisar y promover las licencias sociales podría mejorar la confianza entre las comunidades y las empresas (Smith y Richards, 2015).

Si bien la licencia social para la extracción de arena en estas provincias está influenciada por factores económicos y regulatorios, también está determinada por el contexto social más amplio, incluido el activismo ambiental y la opinión pública a favor del desarrollo productivo. Esta dinámica subraya la necesidad de un diálogo continuo y de estrategias de gobernanza adaptativas para equilibrar el desarrollo económico con el bienestar de la comunidad.

6. DEPÓSITOS DE ARENAS SILÍCEAS

6.1. Ambientes geológicos de formación y calidad de arenas

Los ambientes geológicos más factibles para la generación de yacimientos de calidad para uso como apuntalante son aquellos en los cuales las partículas de arena cuarzosa fueron depositadas discordantemente sobre una superficie transgresiva en un mar poco profundo, con una historia lo más prolongada posible de procesos marinos y eólicos, en una zona de baja subsidencia, que permita un intenso retrabajo de las mismas. Frecuentemente se encuentran en el interior de un cratón lejos de un margen de placa activo (Macellari, 2022) (Fig. 8).

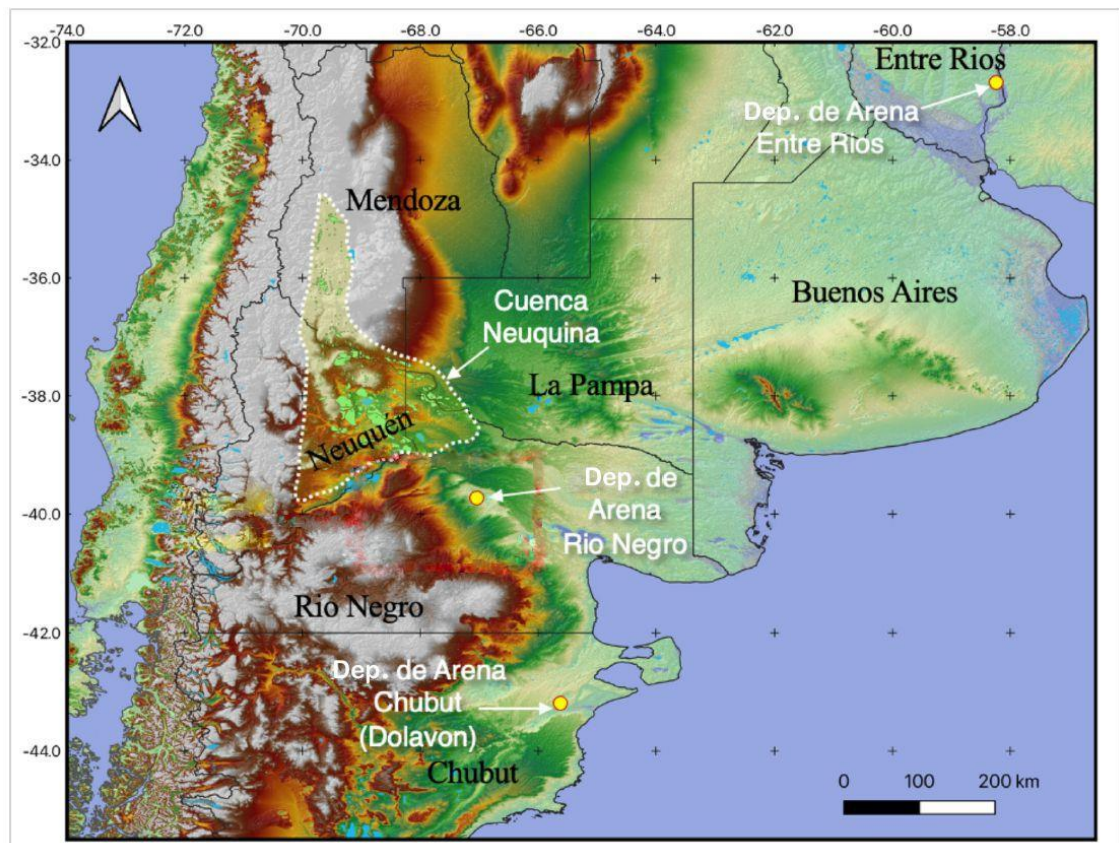


Figura 8. Ubicación de las principales depósitos de arenas silíceas en Argentina. Las arenas de mayor calidad se encuentran en la provincia de Entre Ríos. (tomado de Macellari, 2022).

Dada su ubicación predominante en zonas cratónicas, frecuentemente las arenas de alta calidad se encuentran lejos de las zonas de explotación de hidrocarburos; los depósitos más cercanos a éstos generalmente tienen menor contenido de sílice y menor resistencia al crushing (Anderson, 2011), aunque esto no implica necesariamente su descarte para uso en el proceso de fracking, ya que de hecho también son ampliamente comercializadas y aceptadas por la industria.

Algunas investigaciones intentan establecer relaciones entre los ambientes de formación de los depósitos de arenas silíceas y la resistencia al crushing de éstas. En Dakota del Norte, EEUU. Anderson (2011) ha ensayado muestras de arena de 10 ambientes de formación distintos, que responden de manera diferente al crushing (Fig. 9).

La figura 9 muestra la resistencia a la compresión de diferentes arenas de tipo “Brown sands” de diferentes ambientes y su resistencia al someterse a distintos niveles de tensión. Para su comparación se determina el parámetro K a partir de la cantidad de finos triturados generados a un valor de tensión aplicado determinado y se define como el nivel de tensión más alto que no generará más de un 10% de material triturado según la norma (Cuadro 3). Las muestras 1, 6, 9 y 10 de la figura mencionada se sometieron a un nivel de tensión de 2.000, 3.000 y 4.000 psi y generaron valores K de <2K. Las muestras 7 y 8 se sometieron a tres niveles de tensión de 3.000, 4.000 y 5.000 psi y generaron valores K de 4K. Las muestras 2, 3, 4 y 5 se sometieron a niveles de tensión de 4.000, 5.000 y 6.000 psi y generaron valores K de 4K, 5K, 2K y 5K, respectivamente. Mientras que las arenas de más alta calidad o “White sands” suelen generar valores K en torno a 7K.

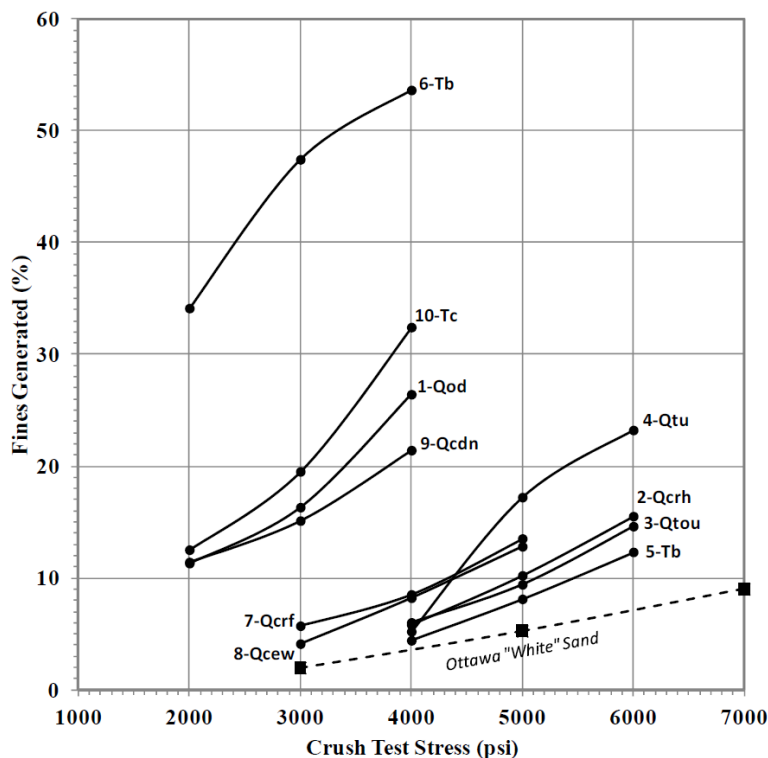


Figura 9. Curvas de ensayo de resistencia a la rotura para muestras de arena seleccionadas de Dakota del Norte: Muestra No. 1 - Arenas eólicas (Qod) de la zona de Denbigh Dunes en el condado de McHenry, Muestra No. 2 - Arena glaciofluvial (Qcrh) del norte del condado de McLean, Muestra No. 3 – Arenas eólicas (Qtou) de la zona de Denbigh Dunes en el noreste del condado de McHenry, Muestra No. 4. - Arena fluvial (QTu) del centro-norte del condado de McKenzie, Muestra n.º 5. - Arena fluvial (preprocesada) de sedimentos de lecho rocoso (Tb) del noroeste del condado de Grant, muestra n.º 6. - Arena fluvial (Tb) de sedimentos de lecho rocoso del centro-norte del condado de Burleigh, muestra n.º 7. - Arenas glaciofluviales (Qcrf) del suroeste del condado de McHenry, muestra n.º 8 - Arenas glaciolacustres (Qcdn) del suroeste del condado de Grand Forks, muestra n.º 9. - Arenas de drift glacial (Qcdn) del centro-oeste del condado de McKenzie, Muestra n.º 10 - Arena fluvial (Tc) de sedimentos del lecho rocoso de la Formación Cannonball en el sur del condado de Burleigh. Tomado de Anderson, 2011.

Esta es una investigación pendiente en los yacimientos argentinos, al menos con el detalle necesario para obtener conclusiones útiles. Si bien en su gran mayoría su explotación para uso como *proppant* es reciente, como se observará en el título siguiente de este Trabajo se están explotando y/o explorando depósitos de arena de playa con retrabajo fluvial (Entre Ríos), depósitos fluviales antiguos, depósitos eólicos y depósitos aluviales de distintos tipos (Cuenca Neuquina y Patagonia) entre otros., que responden de distinto modo al crushing. Sarquís et al. (2018) abordaron esta investigación desde el punto de vista tecnológico procesando muestras de diferentes yacimientos de Argentina, aunque con sitios de proveniencia sólo caracterizados regionalmente (cuenca Patagónica, cuenca Paranaense, Sierras Pampeanas y región de los Andes).

Cuadro 3. Clasificación al 10% de rotura.

Clasificación Presión al 10% de rotura	Presión	
	MPa	Psi
1K	6,9	1.000
2K	13,8	2.000
3K	20,7	3.000
4K	27,6	4.000
5K	34,5	5.000
6K	41,4	6.000
7K	48,3	7.000

6.2. Yacimientos de arenas silíceas en Argentina

6.2.1. Provincia de Río Negro

Las unidades geológicas que incluyen arenas pertenecen a la sección superior de Grupo Neuquén e inferior del Grupo Malargüe, de edades cretácicas.

Sobre la margen sur del río Negro, en el departamento El Cuy, cercano a la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, se hallan una serie de yacimientos de arena silícea. Se ubican en el borde de un área de relieve mesetiforme que está ocupada por terrazas fluviales, en la margen del Río Negro. Tradicionalmente han provisto arena a la industria cerámica del parque industrial de la ciudad de Neuquén. Son depósitos subhorizontales, levemente compactados, de arena cuarzosa de color blanquecino a rosado claro, grano de tamaño mediano a grueso, fácilmente disgregable, con alto contenido en cuarzo y con concreciones calcáreas irregulares. Su espesor oscila entre 2 y 5 metros. El horizonte superior, de hasta 1 m de espesor, es de areniscas cuarzosas medianamente cementadas por carbonatos. El espesor de la cubierta es muy variable según los

sectores (desde 0,5 m hasta varios metros), pudiendo ser limitante para la explotación en algunos sitios. El cuarzo es mayoritario, compone entre el 90 y 95% de la fracción arena y lo acompañan fracciones de minerales que reducen la calidad del depósito, tales como feldespato, ópalo y otros líticos duros entre 5 y 7 %.

Son arenas que pertenecen a la Formación Bajo de la Carpa, del Subgrupo Río Colorado, del Grupo Neuquén (Cretácico, Santoniano) constituidas principalmente por areniscas cuarzosas de grano mediano a grueso, estratificadas en bancos relativamente potentes, mostrando con frecuencia estructura entrecruzada tangencial. En forma subordinada se intercalan conglomerados y fangolitas. Se trata de la unidad geológica que, por poseer los depósitos de arenas de mejor calidad y mejor ubicados, surge como la de mayor interés de la región, en conjunto con la unidad suprayacente, la Formación Anacleto (Subgrupo Río Colorado, Grupo Neuquén) – Campaniano inferior, caracterizada por su composición fangolítica y escasa expresión morfológica, observada en la zona del Lago Pellegrini, depositada en un ambiente fluvial de energía débil a moderada, con cuerpos lacustres en tramos superiores de la unidad (Hugo y Leanza, 2001).

El ambiente de la Formación Bajo de la Carpa es interpretado como sistemas fluviales de baja sinuosidad y abundante carga de lecho arenosa (Garrido, 2000), aunque los paquetes arenosos inferiores tienen origen eólico.

En las Formaciones Portezuelo y Plottier, también pertenecientes al Grupo Neuquén del Cretácico superior, existen otros depósitos con menor exploración y desarrollo, que no han sido explotados o lo han sido en menor escala. Registran un espesor variable entre 0,5 y 3 metros. La Formación Plottier, junto con la Formación Portezuelo, conforma el Subgrupo Río Neuquén. Ambas unidades se ubican estratigráficamente por debajo de la Formación Bajo de la Carpa, que contiene la arena de los yacimientos de la margen sur del río Negro y de los yacimientos del sur del lago Pellegrini.

La Formación Allen, del Grupo Malargüe (edad Campaniano superior – Maastrichtiano inferior), en discordancia sobre la Formación Anacleto, también porta areniscas, intercaladas con arcillas bentoníticas de color verde que se explotan para otros fines. Son de ambiente continental a marino marginal, planicie arenosa con cursos fluviales sujetos a acción mareal. Estas condiciones de ambiente transicional, próximo a la línea de costa, se reconocen en los alrededores del lago Pellegrini.

En otros sitios de la provincia (al sur del cerro Divisadero, al SE de Villa Regina, y varios más), afloran depósitos eólicos, holocenos, compuestos de arenas medianas y finas depositados conformando médanos longitudinales, que no han sido investigados en su totalidad.

6.2.2. Provincia de Chubut

Al ONO de la ciudad de Rawson y al SSE del Bajo de la Tierra Colorada, sobre la ruta provincial 40, al norte de Dolavon, se reconoció un depósito de arenas cuarcíticas, de origen eólico (cantera La Picada) que pertenece a la Formación Puntudo Chico, sedimentitas continentales del Cretácico superior. Su contenido silíceo es muy elevado (> 97 %); el espesor comprobado del horizonte silíceo es 18 metros, e inferido por métodos geofísicos de 40 m máximo (Sacomani y Panza, 1999). En otra cantera cercana, denominada La Esperanza, también con arenas pertenecientes a la Formación Puntudo Chico, se reconocieron dos bancos de areniscas

cuarzosas translucidas a blanquecinas, de grano sub-redondeados a redondeados con >98% en SiO₂, de granulometría fina, friables a inconsolidadas y con escaso cemento arcilloso o calcáreo (Martínez Peck et al. 2017).

También se hallaron arenas silíceas, con menor contenido de cuarzo, en un banco que pertenece al tope de la Formación Salamanca, que aflora discontinuadamente por 13 km de largo, con 2,3 km de ancho. Se explotan en canteras ubicadas al sur del lago Colhué Huapí, en el margen derecho del zanjón del cerro Negro y se utilizan como materia prima para la fabricación de cemento portland (Sciutto et al. 2008).

6.2.3. Provincia de Entre Ríos

Los depósitos localizados en la provincia de Entre Ríos corresponden a importantes depósitos arenosos de ambiente litoral formados durante los eventos transgresivos del Mioceno.

Los depósitos de arenas silíceas más conspicuos se encuentran en una franja de 6 a 15 km al noroeste de Ibicuy, en el departamento Gualaguaychú. Son depósitos de arena superficiales, que constituyen cordones litorales. Adoptan para el área una forma de medialuna con un brazo paralelo al actual río Paraná Ibicuy, que se extiende desde las proximidades de Mazzaruca hasta Ibicuy (unos 12 km) y desvía de allí al noreste hacia la estación General San Martín, donde los depósitos poseen una textura más limosa. Entre Ibicuy y Mazzaruca posee un ancho de alrededor de 1 km.

Los depósitos de arena silícea de Ibicuy poseen un espesor de alrededor de 4 m con un destape que raras veces supera el metro de desarrollo. Son comunes las estructuras entrecruzadas y algunas lentes arcillo arenosas. Se apoyan sobre bancos de arcillas. Las arenas son blancoamarillentas, redondeadas, bien seleccionadas. Granulométricamente son finas, bien seleccionadas, con una moda bien delimitada entre 180 y 250 μ . El tenor silíceo es muy elevado (98,9 %, Arrospide 1999 b).

Otro sector de interés son los depósitos de arena del Arroyo El Salto a unos 3 km de Aldea Brasileira, en el departamento Diamante. Geomorfológicamente, este sector es una peneplanicie cubierta superficialmente por una acumulación de depósitos eólicos. La constitución geológica del área es una secuencia sedimentaria cenozoica cuyos depósitos más antiguos se pueden observar en la parte más baja de los cortes naturales y canteras. Son bancos de arena blanca con estratificación entrecruzada de alto ángulo, de espesores entre 10 y 15 m con algunas lentes de arcillas arenosas, especialmente en la parte más profunda del banco, con encape de hasta 25 metros. Se trata de sedimentos fluvio-eólicos continentales litorales, posibles antiguos médanos sujetos a remociones por procesos eólicos (Arrospide 1999 a).

6.3. Producción de arenas silíceas nacionales

6.3.1. Provincia de Entre Ríos

La provincia de Entre Ríos ha sido y continúa siendo la provincia que encabeza la producción nacional de arenas para fracking y muestra un crecimiento significativo de su producción a partir de 2019 (Fig. 10). La provincia cuenta con 8 empresas, que abastecen también a la producción de vidrios y cristales.

YPF ha construido un polo concentrador de arena silícea en el Departamento de Islas de Ibicuy donde cuenta con una cantera conocida como “El Mangrullo”, un yacimiento caracterizado por depósitos de arenas silíceas maduras, re TRABAJADAS, de muy buena selección. Desde Entre Ríos, la arena se transporta por ruta hasta Buenos Aires y de allí en tren hasta la planta neuquina.

En el mismo departamento de Ibicuy, se localiza Aresil, firma que históricamente ha provisto materia prima para la cerámica y el vidrio, y que en la actualidad se ha volcado al abastecimiento de la actividad petrolera. Lo mismo han hecho Cristamine y San Marcos Trading, dos compañías que históricamente se concentraron en abastecer material para la industria del vidrio, y que en la actualidad han derivado prácticamente toda la producción a la industria de los hidrocarburos.

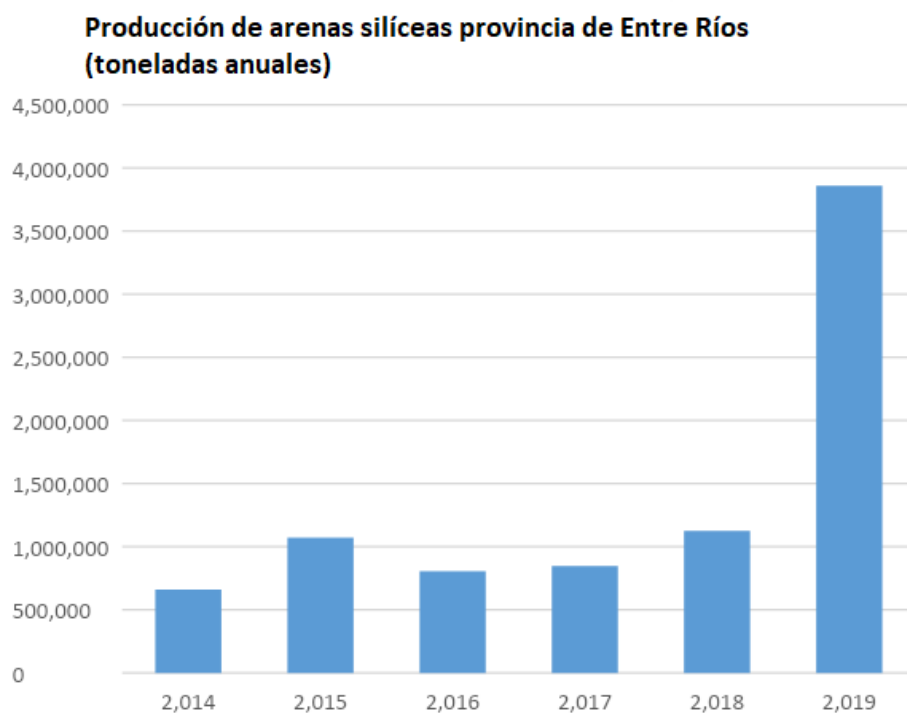


Figura 10. Producción de arenas silíceas de la provincia de Entre Ríos (en toneladas anuales).

6.3.2. Provincia de Chubut

En el año 2016 el gobierno provincial de Chubut autorizó la explotación de canteras de arena para fractura hidráulica en la zona de 28 de Julio y Dolavon. Las canteras de arena se encuentran en el centro-norte de la provincia, cercanos a la localidad de Telsen.

La arena se transporta en camiones a una planta de tratamiento que se construyó a 2 kilómetros al oeste de Dolavon, un trayecto de aproximadamente 80 kilómetros entre caminos rurales y rutas provinciales.

La producción de arenas silíceas en la provincia de Chubut tuvo un importante crecimiento hasta el año 2018 (Fig. 11). Por ejemplo, el Grupo Arenas Patagónicas pasó de 110.000 toneladas en 2016, a 266.000 toneladas en 2017, y a 288.000 toneladas en 2018. Durante 2019 la producción de arenas silíceas tuvo una pronunciada baja, se transportó 140 mil toneladas menos que durante el año 2018. Esto se debió principalmente a una retracción en el consumo del producto, y a la mejor oferta de arena de la provincia de Entre Ríos.

En el año 2020 YPF dejó de adquirir las arenas de Dolavon, aduciendo elevados costos de este centro arenero, y a una serie de conflictos entre productores y transportistas.

**Producción de arenas silíceas provincia de Chubut
(toneladas anuales)**

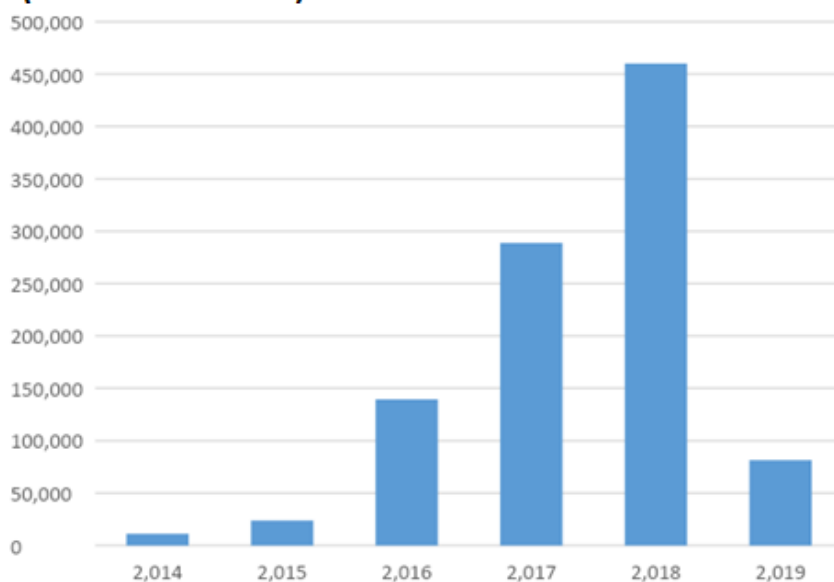


Figura 11. Producción de arenas silíceas de la provincia de Chubut (en toneladas anuales).

6.3.3. Provincia de Río Negro

Durante 2021 la provincia de Río Negro incrementó la búsqueda de recursos de arenas silíceas. De acuerdo con datos de la Secretaría de Minería de esa provincia, en un período muy corto se realizaron casi 600 solicitudes para la instalación de canteras de este recurso tan demandado. La zona abarca desde Villa Regina en el Alto Valle a Ramos Mexia, conocida como Línea Sur.

La provincia ha sumado también otros actores esta tarea. Amplió un convenio de colaboración con el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) con el objetivo de llevar

adelante un estudio en detalle de las potenciales zonas con este recurso mineral. Además, a principios del año 2021, YPF envió a su predio El Mangrullo, en la provincia de Entre Ríos, una carga de arena de la zona del Valle Inferior de Río Negro con la finalidad de ser analizada y obtener información sobre la calidad de las arenas de esa región. La propia empresa estatal de hidrocarburos se encuentra analizando opciones para la obtención de estas arenas, con foco, entre otros sitios, en arenas localizadas en tierras fiscales del Valle Inferior rionegrino.

La factibilidad de uso de las arenas de la región de Río Negro, y su proporción en las mezclas de estos materiales para su consumo efectivo en los pozos de la Cuenca Neuquina, implica un equilibrio entre los requisitos de calidad necesaria y el ahorro de costos por menores fletes.

7. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA TEDELEDETECCIÓN DE ÁREAS PROSPECTIVAS DE DEPÓSITOS DE ARENA SILÍCEA

7.1. Fundamentos

La teledetección satelital es una poderosa herramienta para la prospección de depósitos minerales de interés económico y en este sentido el Sensor ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ha contribuido enormemente (Van der Meer, 2012). Este es un sensor satelital de imágenes ópticas de alta resolución geométrica y radiométrica (Iwasaki y Tonoka, 2005), transportado por el satélite TERRA, puesto en órbita el 18 de diciembre de 1999, presenta un ancho de barrido (swath) de 60 kilómetros y 4 características principales:

Amplio rango espectral. Con 14 bandas distribuidas en tres subsistemas independientes que registran datos de las regiones del espectro correspondiente al visible e infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo medio o de onda corta (SWIR) y del infrarrojo termal (TIR). El VNIR posee 3 bandas (0.52 - 0.86 μm), 6 bandas en SWIR (1.6 - 2.43 μm) y 5 bandas en TIR (8.125 - 11.65 μm).

Alta resolución espacial. Las bandas 1, 2 y 3 del VNIR tienen 15m de resolución; las bandas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 del SWIR tienen 30m de resolución; y las bandas 10, 11, 12, 13 y 14 del TIR tienen 90m de resolución (tabla).

Capacidad estéreo Along-Track. Las bandas 3N y 3B del VNIR permiten obtener pares estereoscópicos a lo largo del camino orbital de cada escena, con una relación B/H=0.6; la precisión en el posicionamiento de un punto dado del modelo digital de elevaciones (DEM) en altura es de 15m (3s) y la precisión referida a la geolocalización (x, y) del DEM es menor de 50m (3s).

Vistas laterales (pointing) de -8,55° / +8,55° en SWIR y TIR y hasta -24° / +24° en VNIR: La revisita es cada 16 días, pero en caso de emergencias, tales como actividad volcánica, deslizamientos, inundaciones e incendios entre otras, pueden programarse registros de datos sobre el área afectada cada 2 días, mediante vistas laterales del sensor de hasta 24° en el VNIR.

Si bien las características de los datos ASTER (Cuadro 4) son aplicables a estudios de todos los recursos naturales, las capacidades espectrales, radiométricas y geométricas del sensor fueron diseñadas para detección de litologías y estructuras en general, identificación de áreas de alteración, distribución precisa de óxidos de hierro, de diferentes minerales de alteración y de rocas con diferente contenido de sílice (Yamaguchi et al, 1998).

Por otro lado, su capacidad estereoscópica permite la generación de un modelo digital de elevaciones del terreno, siendo éste muy importante para la corrección de los datos y para la generación de topografía del área entre otros.

Cuadro 4. Características de bandas ASTER

Subsistema	No de Banda	Rango Espectral μm	Resolución Espacial
VNIR	1	0,52-0,60	15m
	2	0,63-0,69	
	3N	0,76-0,86	
	3B	0,76-0,86	
SWIR	4	1,60-1,70	30m
	5	2,145-2,185	
	6	2,185-2,225	
	7	2,235-2,285	
	8	2,295-2,365	
	9	2,360-2,430	
	10	8,125-8,475	
TIR	11	8,475-8,825	90m
	12	8,925-9,275	
	13	10,25-10,95	
	14	10,95-11,65	

7.2. Espectroscopía de minerales y rocas con datos ASTER

Cuando la radiación electromagnética incide en un mineral o roca, ciertas longitudes de onda son absorbidas y otras reflejadas por el objeto de forma característica de manera que se obtiene una firma espectral única para cada material. Estas respuestas espectrales de los distintos minerales dependen de su composición química y cristalina, como así también de los procesos electrónicos y vibracionales (Goetz et al, 1985, Clark,1999).

Los procesos electrónicos ocurren fundamentalmente en la región del visible e infrarrojo cercano (VNIR) relacionados con efectos de transferencia de carga, transición electrónica en metales de transición (el ión férrico posee un pico de absorción pronunciado alrededor de 0.87 y 0.35 μm) y efectos relacionados al empaquetamiento cristalino. Estos efectos marcan características particulares en las firmas espectrales de los distintos óxidos de hierro, magnesio, cromo, etc. ayudando a la identificación de los mismos en las imágenes satelitales.

Mientras que los procesos vibracionales ocurren en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) y un gran número de minerales presentan características espectrales distintivas en esta

región como por ejemplo silicatos hidratados, carbonatos, hidróxidos, fosfatos, sulfatos, nitratos, etc. Los minerales de alteración pueden ser identificados en las imágenes ASTER debido a que el sensor posee 6 bandas en el rango del infrarrojo cercano y es allí donde dichos minerales poseen características diagnósticas (Fig. 12).

La región del infrarrojo termal en ASTER está representada por 5 bandas que son sumamente útiles para la identificación de distintos minerales formadores de rocas. Propiedades físicas como el tamaño de la partícula y el empaquetamiento cristalino pueden producir cambios en el espectro de emisión tales como la profundidad de los picos de absorción.

Los silicatos, el grupo de minerales más abundantes en la corteza terrestre, poseen características espectrales distintivas en el TIR debido a que, en esta región del espectro electromagnético, las características espectrales de los silicatos varían en función de su contenido en sílice (Fig. 13).

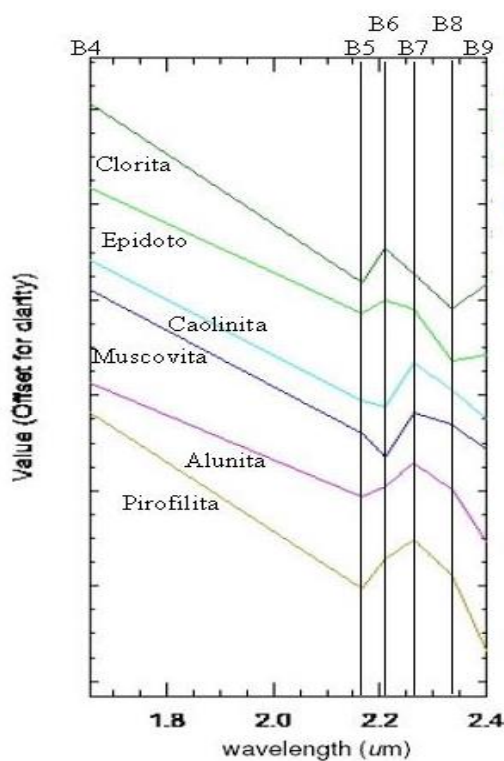


Figura 12. Curvas espectrales para las bandas del SWIR de ASTER donde se puede apreciar los picos de absorción de los minerales de alteración hidrotermal. Espectros obtenidos de la librería espectral del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

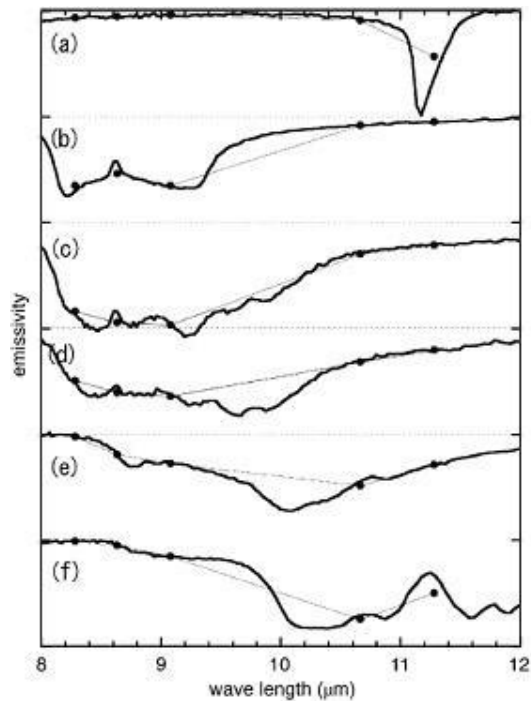


Figura 13. Espectros de emisividad para distintas rocas: roca carbonática (a), cuarcita (b), granito (c), diorita (d), gabro (e), peridotita (f). Los puntos en los espectros muestran los valores de emisividad para las bandas del TIR del sensor ASTER. Tomado de Ninomiya (2004).

7.3. DESARROLLO METODOLÓGICO APLICADO

El procesamiento de imágenes se llevó a cabo en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick, 2017) que combina un catálogo de varios petabytes (1 Petabyte es igual a 1000 Terabytes) de imágenes satelitales y conjuntos de datos geospaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Científicos, investigadores y desarrolladores utilizan Earth Engine para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar las diferencias en la superficie de la Tierra. Earth Engine está disponible para uso comercial, y sigue siendo gratuito para uso académico y de investigación.

A partir de la mencionada plataforma, se generó la siguiente secuencia de comandos o “script” en lenguaje Javascript:

```
vargeometry=
ee.FeatureCollection('users/dazcur/ign_capas/IGN_pais').filter(ee.Filter.eq('nam', 'Argentina'));

var dataset = ee.Image('NASA/ASTER_GED/AG100_003').clip (geometry);

var elevation = dataset.select('elevation');

var ndvi= dataset.select('ndvi')

var elevationVis = {
  min: -15.0,
```

```
max: 5000.0,
palette: [
  '0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef', '3ae237',
  'b5e22e', 'd6e21f', 'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08',
  'ff500d', 'ff0000', 'de0101', 'c21301'
],
};
Map.centerObject(geometry, 4);
Map.addLayer(elevation, elevationVis, 'Elevation');

// Construiremos los distintos indices (Ninomiya 2004)
// Creamos las imagenes de los Indices Mineralogicos
var imagen= dataset
var si = imagen.expression('D13/D12',{
  D13: imagen.select('emissivity_band13'),
  D12: imagen.select('emissivity_band12')
})
//return qi.updateMask(si.gt(0)).rename('Si')
//.addBands(si.updateMask(si.gt(0)).rename('Si'))

// Aplico la función para generar el índice Si
var ASTERemis_Si = si
print(ASTERemis_Si, 'Resultado Si')
//{max: 1.05, min: 0.9, palette: ['blue','yellow','green']}
Map.addLayer(ASTERemis_Si,{max: 1.5, min: 0.9, palette: ['blue','yellow','red']}, 'Si')
// descarga de datos
Export.image.toDrive({
  image: ASTERemis_Si,
  description: 'GEE_ASTER_SI',
  scale: 100,
  folder: 'GEE_ASTER_SI',
```



```
    crs: "EPSG:4326",
    region: bounds,
    maxPixels: 10E12,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    formatOptions: {
      cloudOptimized: true
    }
  });

  Export.image.toDrive({
    image: ndvi,
    description: 'GEE_ASTER_NDVI',
    scale: 100,
    folder: 'GEE_ASTER_NDVI',
    crs: "EPSG:4326",
    region: bounds,
    maxPixels: 10E12,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    formatOptions: {
      cloudOptimized: true
    }
  });

  Export.image.toDrive({
    image: elevation,
    description: 'GEE_ASTER_elevation',
    scale: 100,
    folder: 'GEE_ASTER_elevation',
    crs: "EPSG:4326",
    region: bounds,
    maxPixels: 10E12,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    formatOptions: {
      cloudOptimized: true
```

```
}  
});
```

El mencionado script utiliza la base de datos ASTER-GED (https://lpdaac.usgs.gov/documents/120/ASTERGED_User_Guide_V3.pdf). Dicha base contiene bandas térmicas de ASTER en valores de emisividad a una resolución espacial de 100 metros. A partir de estos datos se generó el índice de sílice Si (Ninomiya, 2004) definido como el cociente entre las bandas 12 y 13 (Cuadro 5) de las imágenes ASTER. Los datos fueron obtenidos para el territorio argentino.

Cuadro 5. Fórmula aplicada para el Índice de Sílice.

$$Si = \frac{\text{banda 12}}{\text{banda 13}}$$

Posteriormente se definió el valor de 1,05 como umbral. A partir de este umbral los valores mayores corresponden a la presencia de rocas ricas en sílice (Fig. 14).



Figura 14. Carta imagen de Argentina: En verde se resalta la presencia de rocas con alto contenido de sílice.

Los datos obtenidos a partir del procesamiento de imágenes ASTER identifican tanto depósitos de arena sílicea (explotados o no) como rocas ricas en sílice, de manera que debe procederse a la posterior interpretación visual de las imágenes, con soportes de datos geológicos.

A modo de ejemplo, en las figuras 15, 16 y 17 se observan áreas identificadas en las provincias de Entre Ríos, Neuquén, Rio Negro y Chubut, provincias donde se encuentran depósitos conocidos de arenas síliceas.

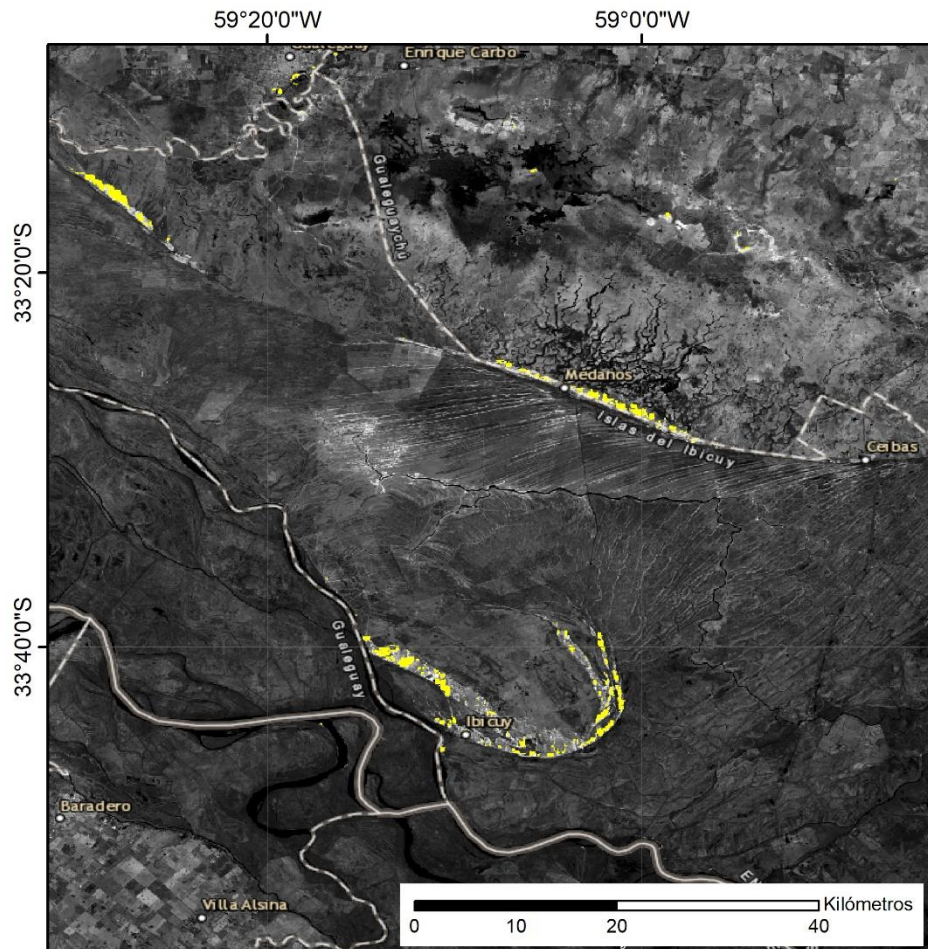


Figura 15. Respuesta de teledetección de depósitos de arena sílicea (áreas en amarillo), sobre mosaico de imágenes LandSat 8 banda 5, del sector sur de la provincia de Entre Ríos.

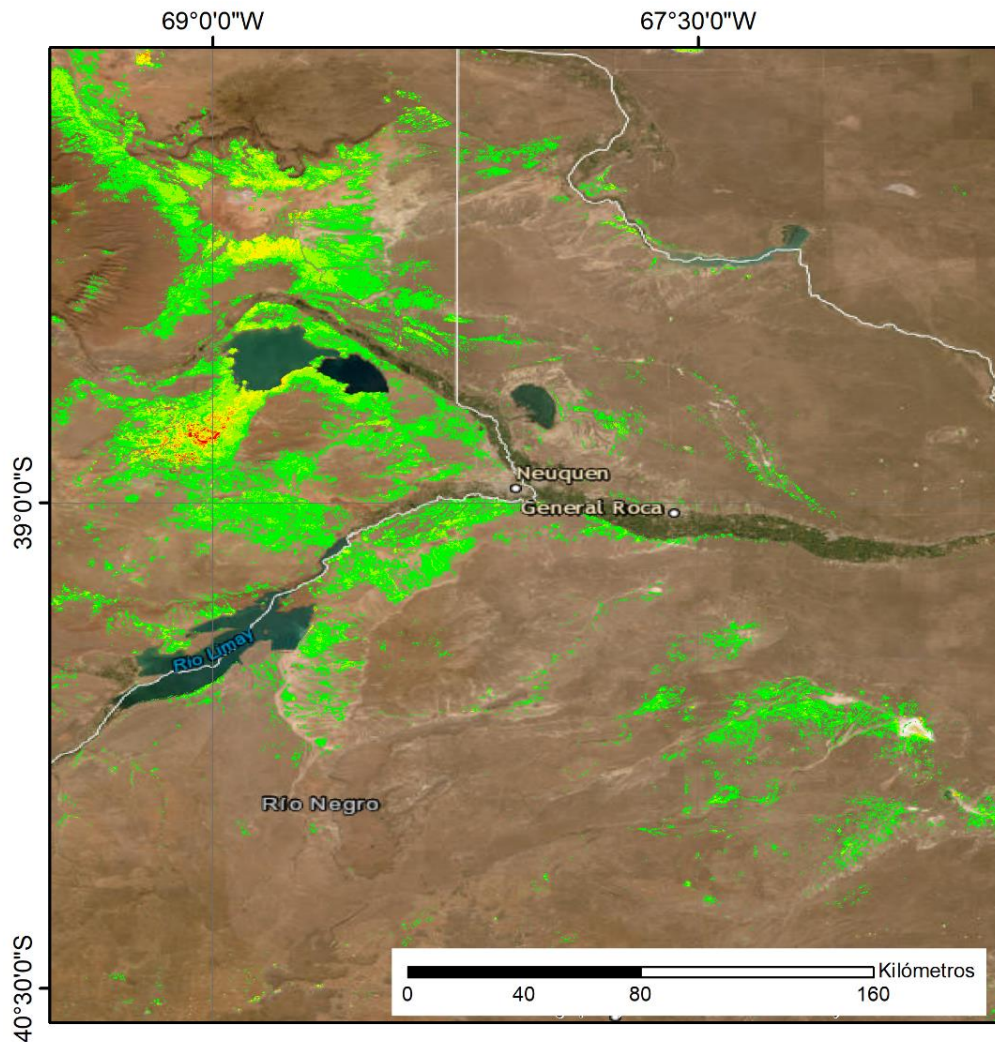


Figura 16. Respuesta de teledetección de depósitos de rocas y arenas silíceas (áreas en Verde) en el norte de la provincia de Río Negro y este de la provincia de Neuquén.

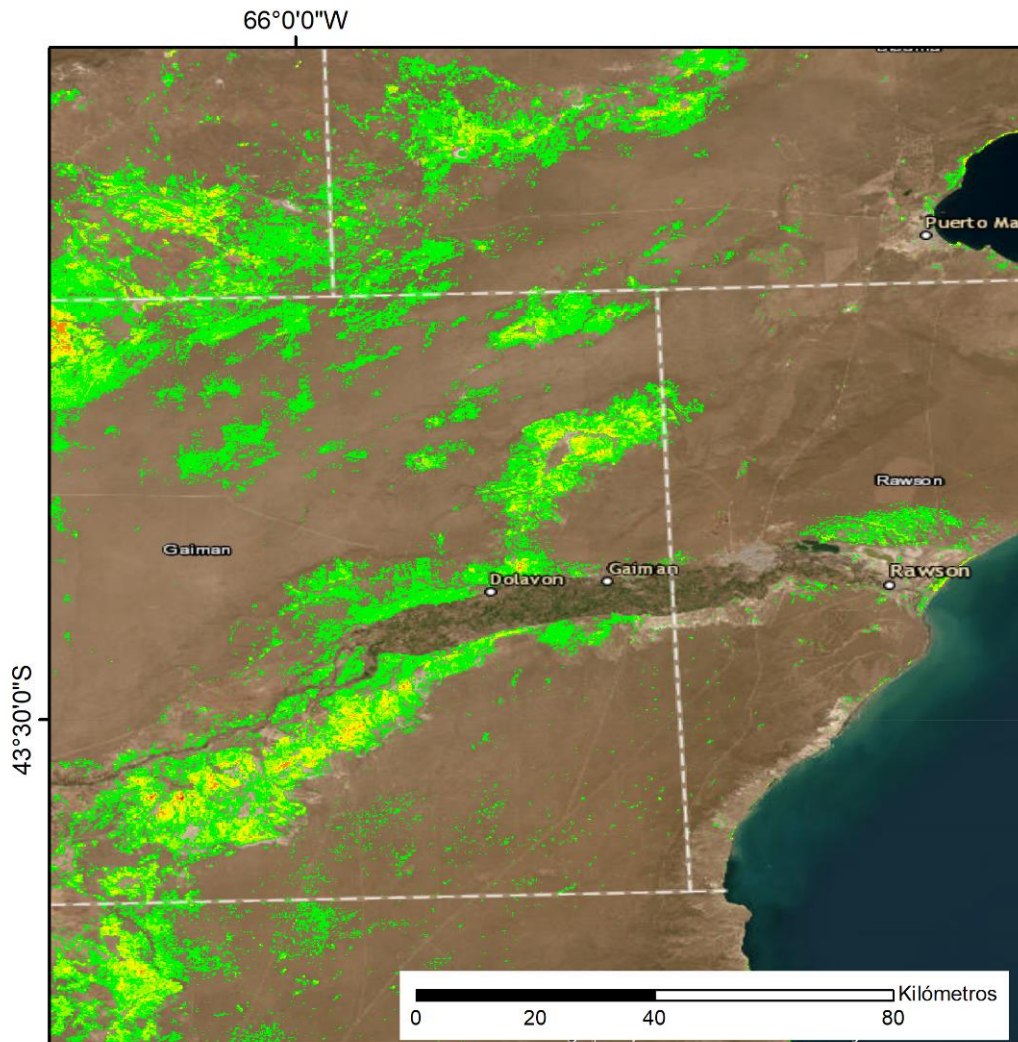


Figura 17. Respuesta de teledetección de depósitos de rocas y arenas síliceas (áreas en Verde en el centro y centro-este de la provincia de Chubut.

8. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA APLICADA AL ANÁLISIS DIGITAL DE LA MORFOMETRÍA DE ARENAS

En el contexto de este estudio, se utiliza el procesamiento y análisis de imágenes como una técnica para extraer información cuantitativa con el fin de construir diagramas que ilustren la distribución de ciertas propiedades morfométricas de las arenas, entre ellas el tamaño y forma de grano.

8.1. Preparación de muestras y adquisición de imágenes

Se seleccionaron muestras de arena comercial estándar de Texas, EEUU, de uso petrolero, y de arena de un sitio seleccionado en Cuenca neuquina de Argentina.

Muestras de cada arena se vertieron en una caja de cartón negra para ser medidas con el microscopio estereoscópico Greenough, Leica S8 APO (Fig.18) perteneciente al laboratorio del área de Recursos Minerales del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Este microscopio tiene un zoom apocromático de 8:1 y una distancia de trabajo de 75 mm, permitiendo un fácil acceso a la muestra, incluso con aumentos de hasta 80x, lo que resulta recomendable para aplicaciones de control de calidad (<https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/stereo-microscopes/p/leica-s8-apo/>).

Luego se obtuvieron imágenes en formato .tif a partir del software Leica Application Suite, que conecta la lupa Leica DFC295 con la PC utilizada.



Figura 18. Microscopio estereoscópico Greenough Leica S8 APO y cámara acoplada, utilizado para las observaciones en muestras de arena seleccionadas (Gentileza SEGEMAR).

8.2. Software de análisis de imágenes

El procesamiento y análisis de imágenes se realizó utilizando el programa de código abierto 'Fiji', que es una versión mejorada de la herramienta de análisis de imágenes 'ImageJ' (Schindelin et al., 2012). Dicho programa permite la automatización de procesos a partir de la ejecución de secuencias de comandos o instrucciones en un lenguaje de programación específico (scripts). Estos scripts automatizan tareas repetitivas o complejas y permiten la interacción con software. A diferencia de ImageJ, estos complementos se almacenan en el software, y los usuarios pueden compartir sus scripts a través del sistema de actualización integrado. Fiji es una herramienta particularmente popular en el campo de las ciencias biológicas, donde se usa comúnmente para el análisis de células y partículas, debido a su capacidad para identificar y aislar formas y luego realizar análisis de múltiples propiedades, incluida su geometría, color, tamaño y densidad. En el campo de las ciencias de la tierra, Fiji se ha aplicado principalmente al análisis de granos y cristales (Heilbronner y Barrett, 2013).

Antes de fijar la imagen con el microscopio para el posterior análisis, se debe tomar la precaución de que los granos estén separados unos de otros (Fig. 19), permitiendo así la correcta clasificación de cada uno de ellos y la medición de sus parámetros geométricos individuales. En los casos en que resulte difícil lograr esta separación, se toman varias imágenes de cada muestra, para obtener la mayor cantidad de granos en las condiciones anteriormente descritas.



Figura 19. Imagen de granos de arena obtenida a partir de lupa Leica.

8.3. Procesamiento de imágenes de arenas

El primer paso posterior a la apertura de las imágenes consiste en el escalado, que se realiza vinculando el valor de la escala gráfica, ubicado en las imágenes en el sector inferior izquierdo (Fig. 20), con la cantidad de píxeles que mide la escala en la imagen.

Posteriormente se convierten las imágenes a niveles de grises en 8 bits y se corre un filtro estadístico de la mediana de radio de dos píxeles para eliminar el ruido en la imagen. Luego las

imágenes son convertidas a imágenes de 2 bits de resolución radiométrica, de manera que los granos individuales son clasificados a partir de un valor de umbral que se define a partir de los valores de brillo que se pueden observar en el histograma de la imagen. La imagen de 2 bits queda definida por dos valores, el negro, donde se clasificarían los granos, y el blanco, donde se clasificaría el fondo (Fig. 20). Nótese, en la misma figura, que pequeños puntos se clasifican como si fueran pequeños granos, esto es debido a un efecto de la luz de la lupa sobre la cartulina negra, que a estas dimensiones presenta ciertas reflexiones con valores de brillo semejante al de las arenas, aunque este efecto puede filtrarse fácilmente por su diferencia de tamaño. Por otra parte, algunos granos aparecen parcialmente en los límites de las imágenes; esto también es filtrado a partir de una máscara que no clasifique granos con muy baja circularidad. Este último filtro enmascara también los granos que se encuentran en contacto y los granos que coinciden con la escala y la referencia de la imagen.

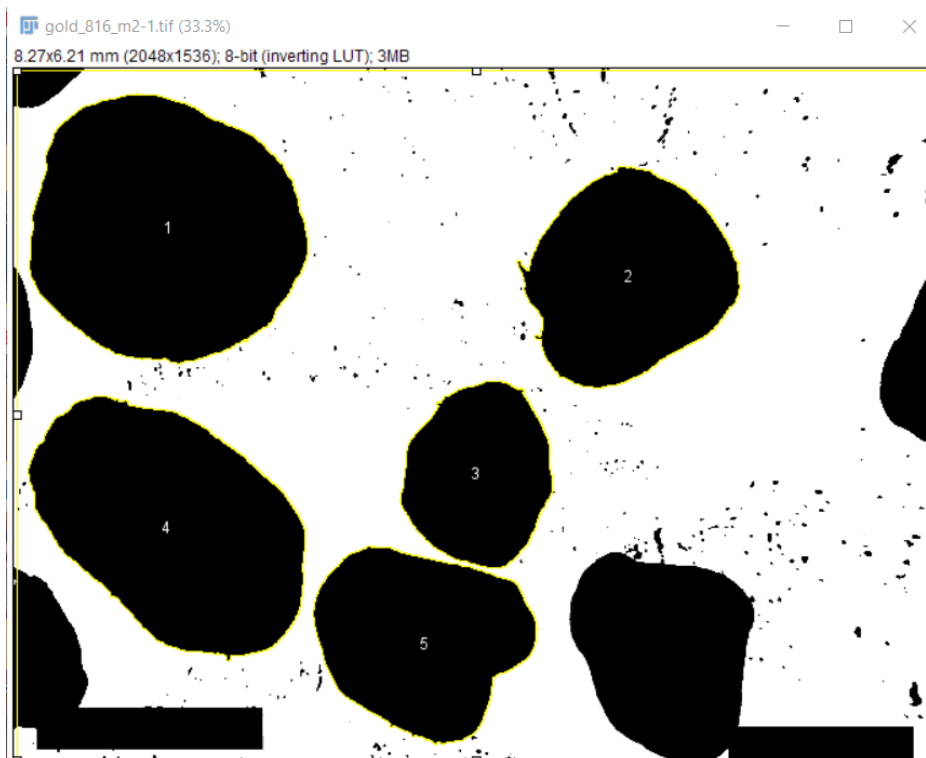


Figura 20. Imagen de granos de arena convertida a 2 bits de resolución radiométrica.

Una vez realizados los procedimientos descriptos, se procede al conteo de los granos (Fig. 20). Luego, se ordena que el comando 'Analyze particles' de la ventana 'Analyze' (Cuadro 6) mida los siguientes parámetros:

- Área
- Perímetro
- Eje mayor
- Eje menor
- Ángulo
- Circularidad
- AR (relación de aspecto)

- Roundness (redondez)
- Solidity de la imagen

El área se refiere a la superficie de cada grano medida en mm², ya que la imagen está calibrada espacialmente, mientras que el perímetro se refiere a la longitud del límite exterior de la selección.

Los ejes mayor y menor son los ejes primario y secundario de la elipse que mejor se ajuste, y el ángulo (0-180 grados) es el ángulo entre el eje primario y una línea paralela al eje x de la imagen.

Cuadro 6. Tabla con resultados obtenidos a partir de la medición del Comando 'Analyse Particules'.

Label	Area	Mean	Perim.	Major	Minor	Angle	Circ.	AR	Round	Solidity
gold_816_m2-1.tif	4.637	255	8.300	2.532	2.332	149.988	0.846	1.086	0.921	0.987
gold_816_m2-1.tif	2.704	255	6.805	1.983	1.737	48.582	0.734	1.142	0.876	0.967
gold_816_m2-1.tif	1.712	255	5.151	1.654	1.317	81.610	0.811	1.256	0.796	0.979
gold_816_m2-1.tif	3.989	255	7.974	2.856	1.778	140.208	0.788	1.607	0.622	0.982
gold_816_m2-1.tif	2.497	255	6.406	1.947	1.632	162.706	0.765	1.193	0.838	0.964

La circularidad es obtenida a partir de la fórmula:

$$Circ = 4\pi \cdot \text{área} / \text{perímetro}^2$$

El valor de 1,0 indica un círculo perfecto; a medida que el valor se acerca a 0,0 indica una forma cada vez más alargada. El índice de circularidad es el equivalente 2D del índice de esfericidad.

El índice AR (relación de aspecto) se refiere a la razón entre el eje mayor y el menor.

La Redondez (Roundness) es obtenida a partir de la fórmula: $4 \cdot \text{área} / (\pi \cdot (\text{eje mayor})^2)$.

El parámetro "Solidity" calcula el cociente entre el área y el área convexa, definida esta última como la menor forma convexa que contiene al objeto (Fig. 21). El valor 1 significa que el objeto no presenta irregularidades, mientras que valores de "solidity" menores implican que el objeto es más irregular.

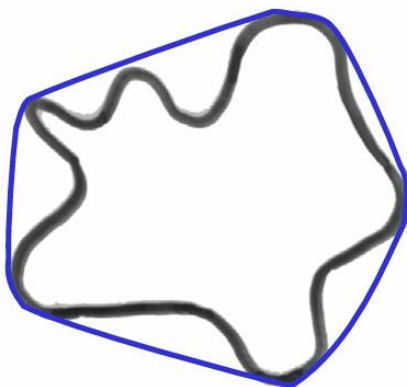


Figura 21. En azul se muestra el perímetro del área convexa del objeto.

Para este estudio, se tomaron entre 10 y 11 imágenes de cada muestra, con el objetivo de clasificar mayor número de granos de arena. Los datos obtenidos a partir de la clasificación fueron guardados en una tabla Excel (Cuadro 7) para su posterior análisis.

Cuadro 7. Mediciones realizadas para una muestra de arenas Gold 8/16 (procedencia: Texas, USA).

Mediciones Muestras Gold 8/16									
Label	Area (mm)	Perim. (mm)	Major (mm)	Minor (mm)	Angle	Circ.	AR	Round	Solidity
gold_816_m1.tif	2.6330	6.3320	2.0740	1.6160	37.0950	0.8250	1.2830	0.7790	0.9830
gold_816_m2.tif	4.6370	8.3000	2.5320	2.3320	149.9880	0.8460	1.0860	0.9210	0.9870
gold_816_m2.tif	2.7040	6.8050	1.9830	1.7370	48.5820	0.7340	1.1420	0.8760	0.9670
gold_816_m2.tif	1.7120	5.1510	1.6540	1.3170	81.6100	0.8110	1.2560	0.7960	0.9790
gold_816_m2.tif	3.9890	7.9740	2.8560	1.7780	140.2080	0.7880	1.6070	0.6220	0.9820
gold_816_m2.tif	2.4970	6.4060	1.9470	1.6320	162.7060	0.7650	1.1930	0.8380	0.9640
gold_816_m3.tif	2.2070	6.2790	2.0110	1.3980	57.5900	0.7030	1.4390	0.6950	0.9600
gold_816_m3.tif	3.0130	6.9180	2.1350	1.7970	39.5280	0.7910	1.1880	0.8410	0.9730
gold_816_m3.tif	2.8880	6.8020	2.2920	1.6040	109.1270	0.7840	1.4290	0.7000	0.9820
gold_816_m3.tif	2.7950	6.7120	2.0510	1.7350	112.8550	0.7800	1.1820	0.8460	0.9770
gold_816_m3.tif	1.7710	5.3460	1.7560	1.2840	105.5540	0.7790	1.3680	0.7310	0.9710
gold_816_m4.tif	1.9840	6.0120	1.9790	1.2770	42.2450	0.6900	1.5500	0.6450	0.9540
gold_816_m4.tif	1.6840	5.3660	1.4870	1.4420	19.0510	0.7350	1.0310	0.9700	0.9640
gold_816_m4.tif	3.2840	7.9210	2.3150	1.8060	85.1690	0.6580	1.2820	0.7800	0.9650
gold_816_m4.tif	2.5670	6.5960	1.9640	1.6640	10.9250	0.7420	1.1800	0.8470	0.9670

9. APLICACIÓN DE LOS DESARROLLOS LOGRADOS

Con el objeto de comprobar la aplicabilidad de los desarrollos logrados, para la verificación del método de medición de parámetros morfométricos se eligieron dos materiales previamente reconocidos: una arena Texas Gold de uso común en el mercado petrolero americano, y una arena de una cantera comercial de la provincia de Neuquén no utilizada en el mercado petrolero.

Para la comprobación de los resultados de la teledetección remota de depósitos de arena silícea se eligió un área de la cuenca neuquina cercana a la localidad de Rincón de los Sauces.

9.1. Teledetección de Depósitos de arena silícea en Argentina

El área de estudio se ubica cercana a la localidad de Rincón de los Sauces, provincia de Neuquén (Fig. 22). Los resultados obtenidos a partir del índice de sílice dan positivo para este sitio.

Se destacan los depósitos de arena que pertenecen a los depósitos fluviales antiguos del río Colorado unidad geológica mapeada en Leanza et al. (2024), escala 1:250.000, constituida por gravas, arenas y limos del Pleistoceno Superior (Fig. 23). El material de este sitio fue muestreado para el ensayo de parámetros morfométricos que se presenta en este TFI.

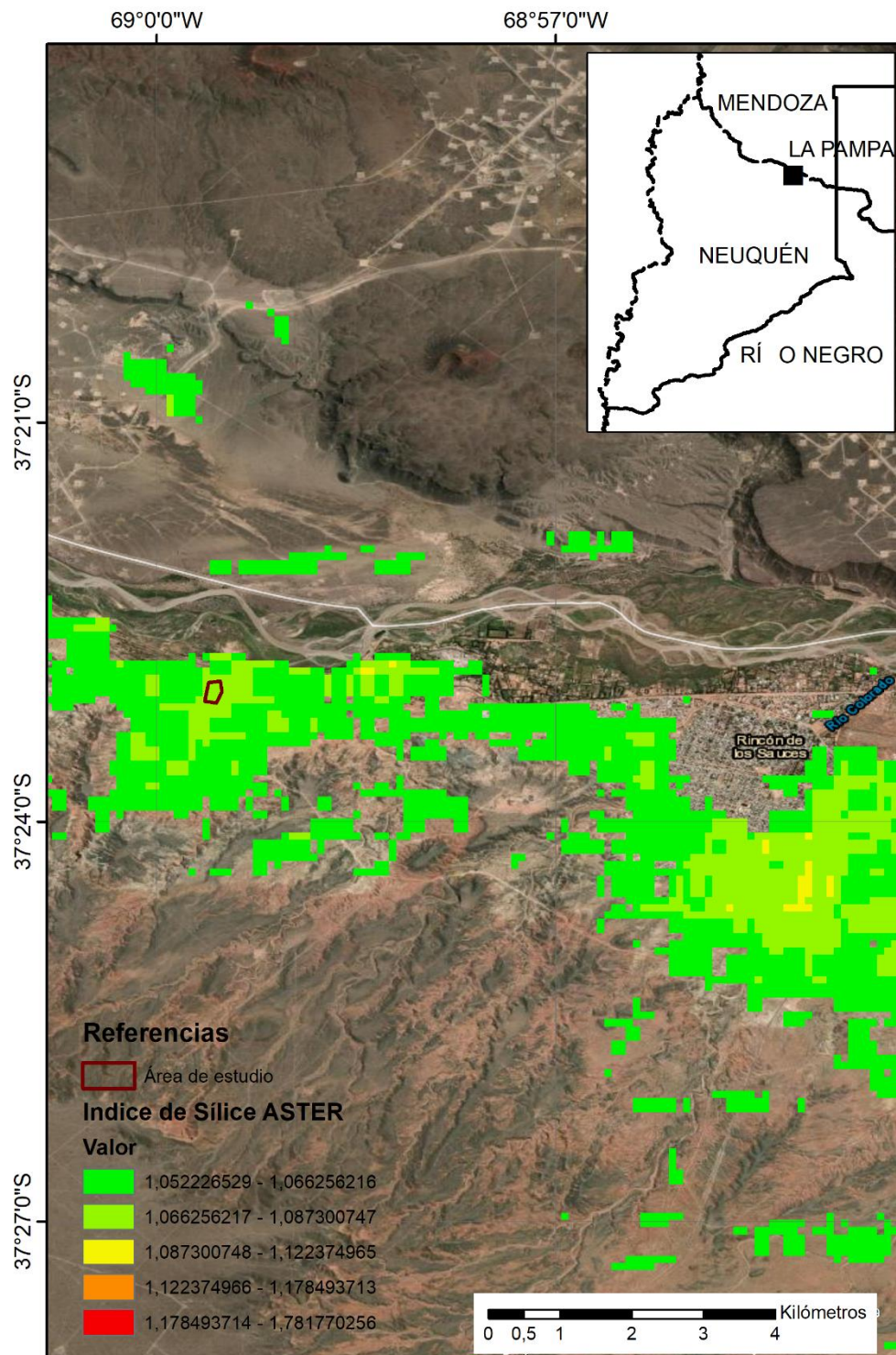


Figura 22. Ubicación del área de estudio sobre imagen satelital de alta resolución y valores de índice de sílice.

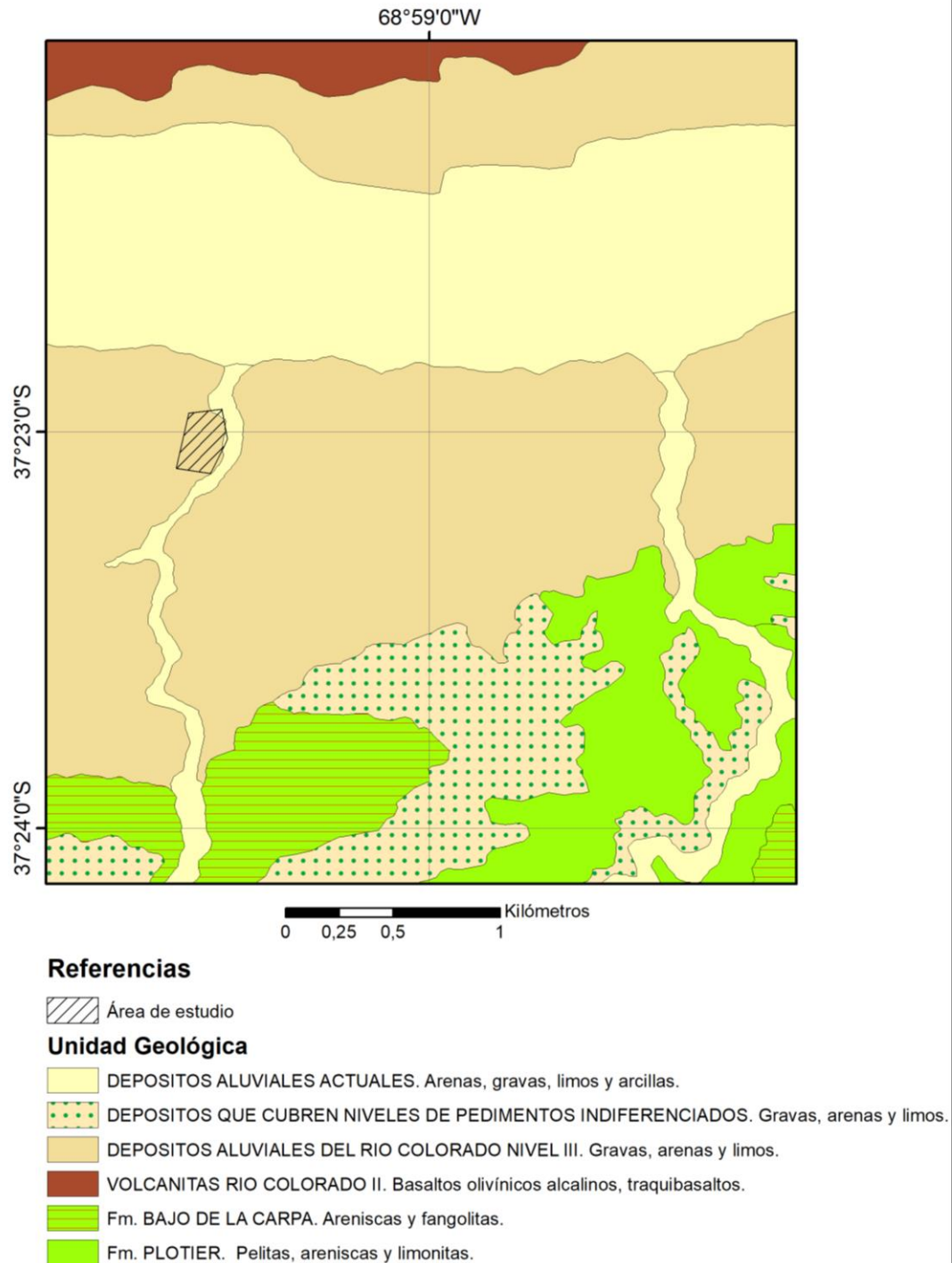


Figura 23. Mapa geológico del área de estudio modificado de Hoja Geológica 3769 - IV Catriel a escala 1:250.000 (Wilson et al., inédita).

9.2. Medición de parámetros morfométricos de calidad de arenas con métodos digitales

Se eligieron dos materiales previamente reconocidos, en extremos de calidad: una arena Texas Gold de uso común en el mercado petrolero americano, y una arena de una cantera comercial de la provincia de Neuquén no utilizada en el mercado petrolero.

En la arena no comercializada, el material in situ contiene una fracción comprendida entre mallas 12 y 40 que representa más del 50 % del volumen total de material (Fig. 24) y posee de 80 a 85 % de cuarzo.

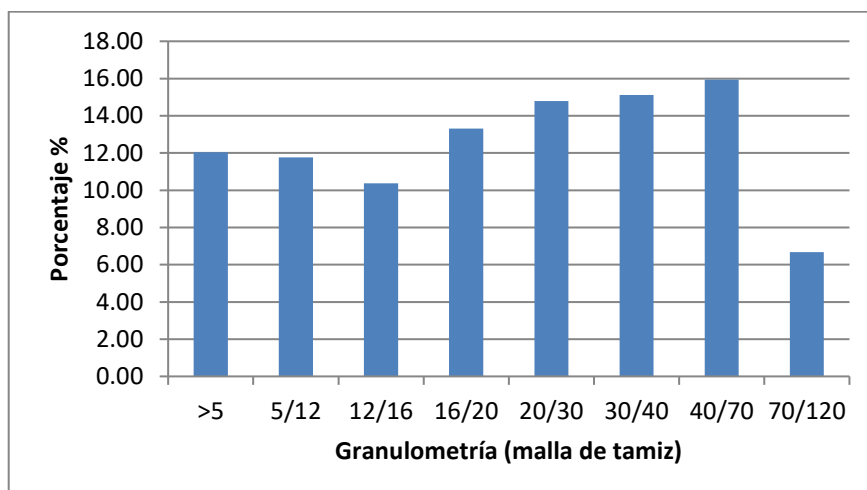


Figura 24. Distribución granulométrica original de la arena “in situ”, en la área de estudio.

Luego de un tratamiento físico que implicó descartar magnéticos y someter el material a desagregación mecánica y lavado, la distribución granulométrica final (Fig. 25) varió sustantivamente, resultando 12.5 % de material más fino que malla 40 y 87.5 % de material comprendido en las mallas 10/40. Además, el contenido de granos de cuarzo alcanzó 90 %.

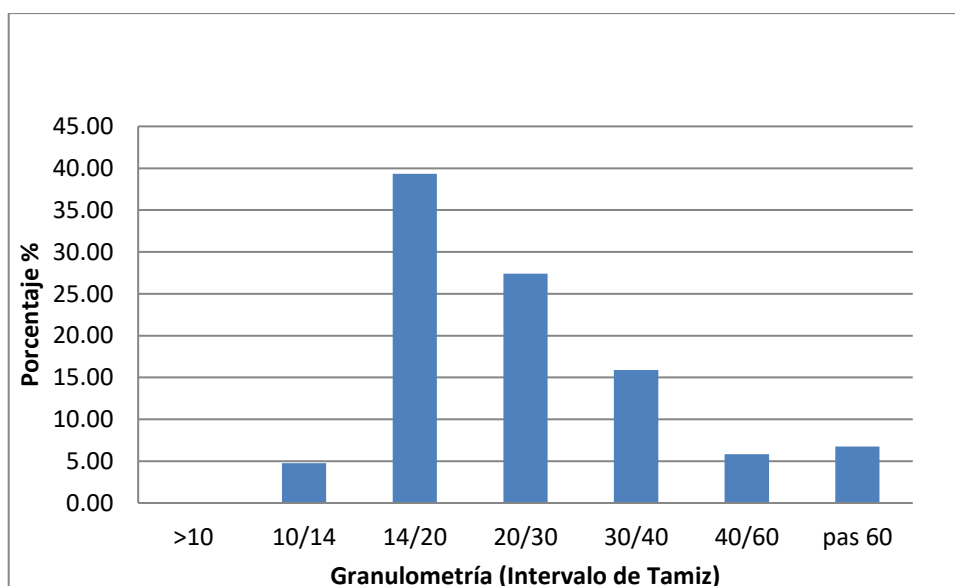


Figura 25. Distribución granulométrica de la fracción sílicea de la arena ensayada.

Sobre este material se realizaron mediciones de los parámetros de circularidad y redondez, de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo anterior de este TFI.

Para validar la metodología de medición se utilizaron como referencia arenas Texas Gold. Se seleccionaron las fracciones granulométricas de intervalo de tamiz 8/16 y 30/50 (Figs. 26 y 27).



Figura 26. Imagen de arenas Texas Gold fracción malla 8/16.



Figura 27. Imagen de arenas Texas Gold fracción malla 30/50.

9.3. Mediciones

Se midieron 15 granos de arena de la muestra Gold 8/16 (Fig. 28) en los cuales se verifica valores de circularidad y redondez 100 % (15/15) por encima del valor 0,6 para ambos parámetros. Para la circularidad, 12/15 resultaron $> 0,7$ mientras que 3/14 $> 0,8$. Para la redondez, 7/15 resultaron $> 0,8$.

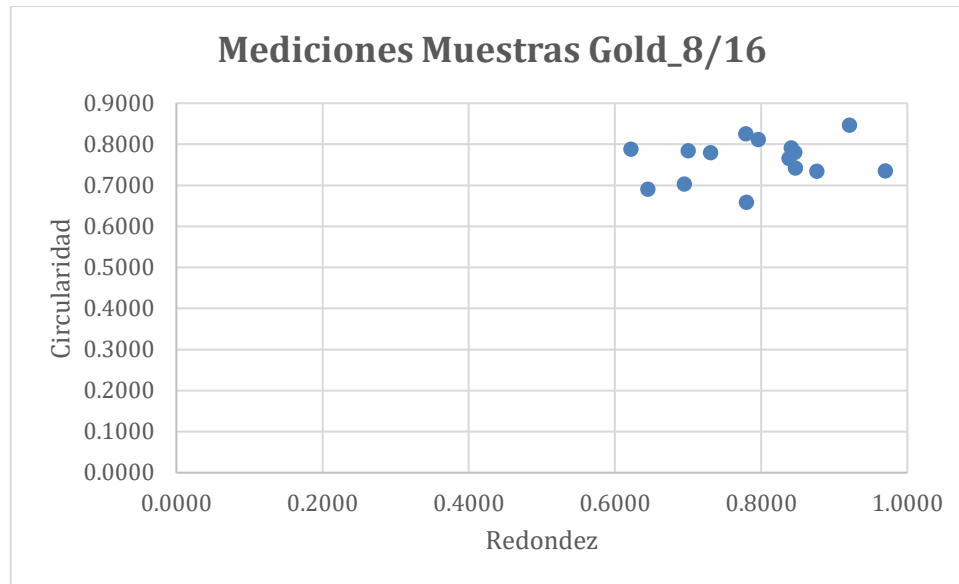


Figura 28. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena Texas Gold 8/16.

Además, se midieron circularidad y redondez de 76 granos de arena de la muestra malla 30/50 (Fig. 29); los valores son 94 % > 0,6 y 20 % > 0,8 para ambos parámetros.

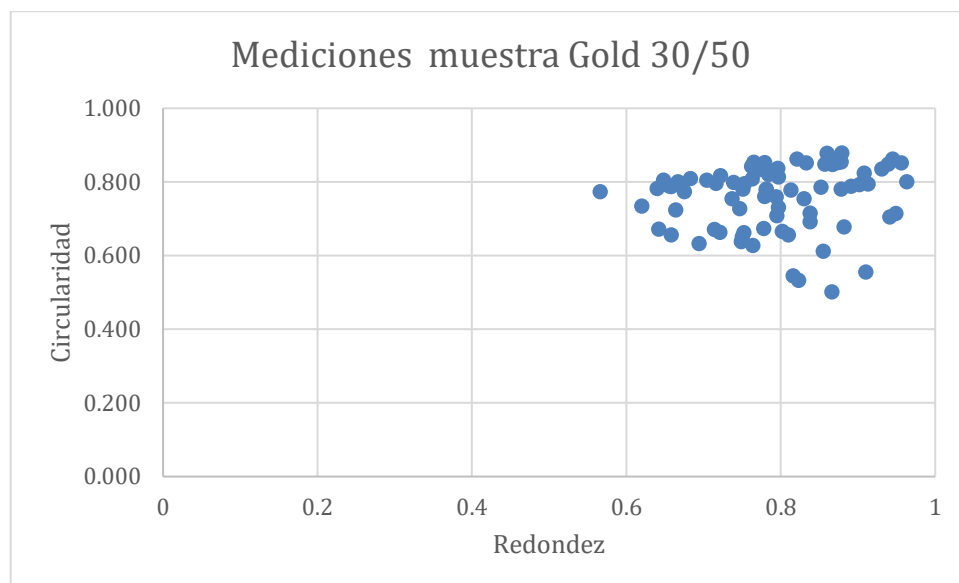


Figura 29. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena Texas Gold 30/50.

Posteriormente se realizaron mediciones en las muestras de la zona de estudio, en las fracciones granulométricas 10/14; 14/20; 20/30; 20/40; 30/40.

En la fracción 10/14 se midieron 35 granos de arena (Fig. 30). Treinta y uno (31) de ellos resultaron > 0,6 para ambos parámetros. El 50 % resultó con redondez > 0,8 y circularidad comprendida entre 0,6 y 0,8.

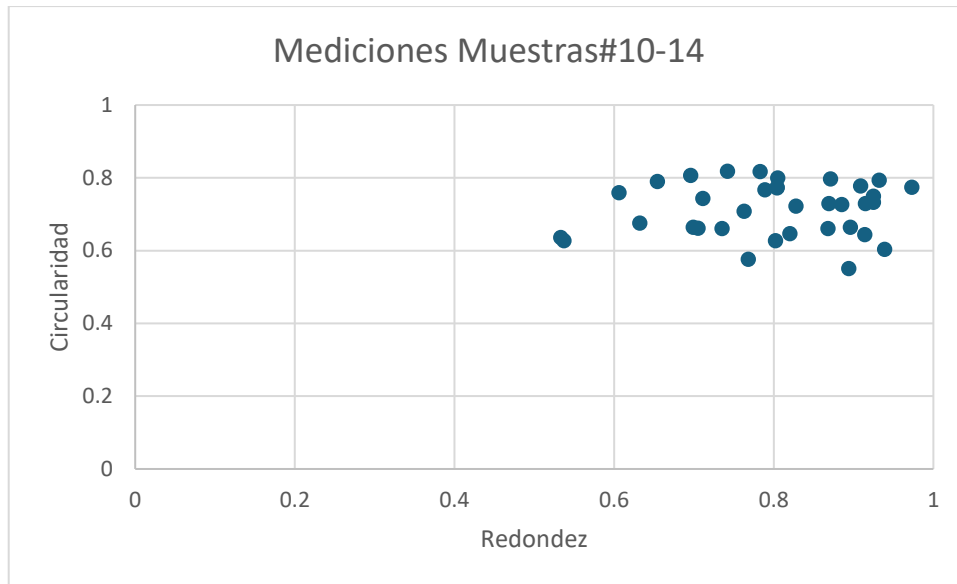


Figura 30. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 10/14.

En la fracción 14/20 se midieron 48 granos de arena (Fig. 31). El 75 % presentó valores superiores a 0,6 de redondez y esfericidad.

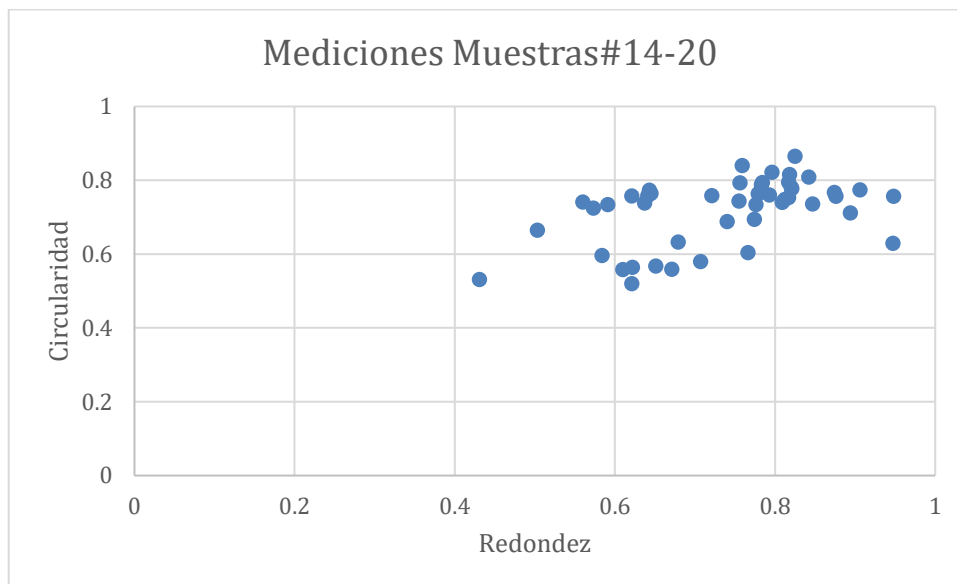


Figura 31. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 14/20.

En la fracción 20/30 se midieron 87 granos de arena (Fig. 32); de los cuales el 77 % de los granos superó 0,6 en redondez y circularidad.

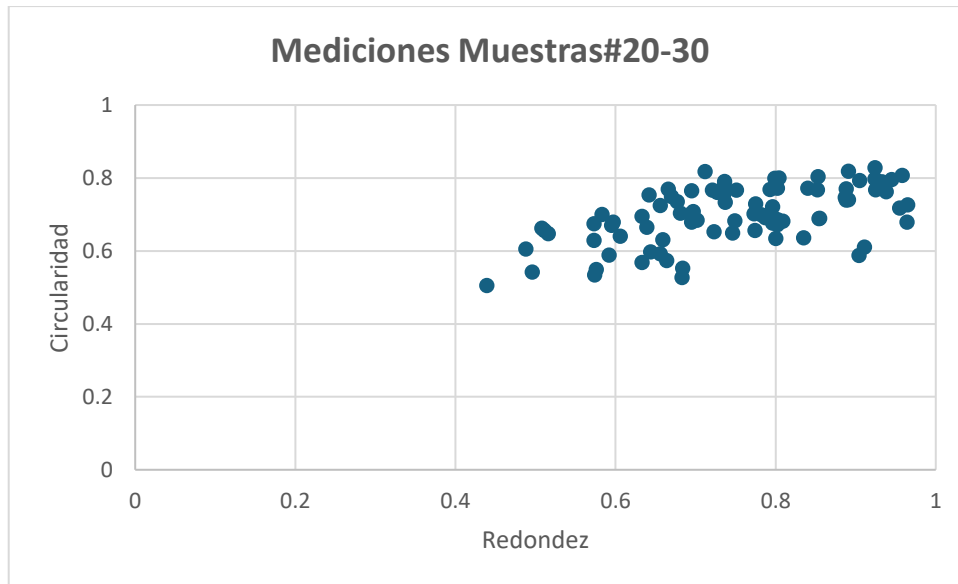


Figura 32. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 20/30.

En la fracción 20/40 se midieron 280 granos de arena (Fig. 33), de los cuales el 70 % de los granos presentó valores superiores a 0,6.

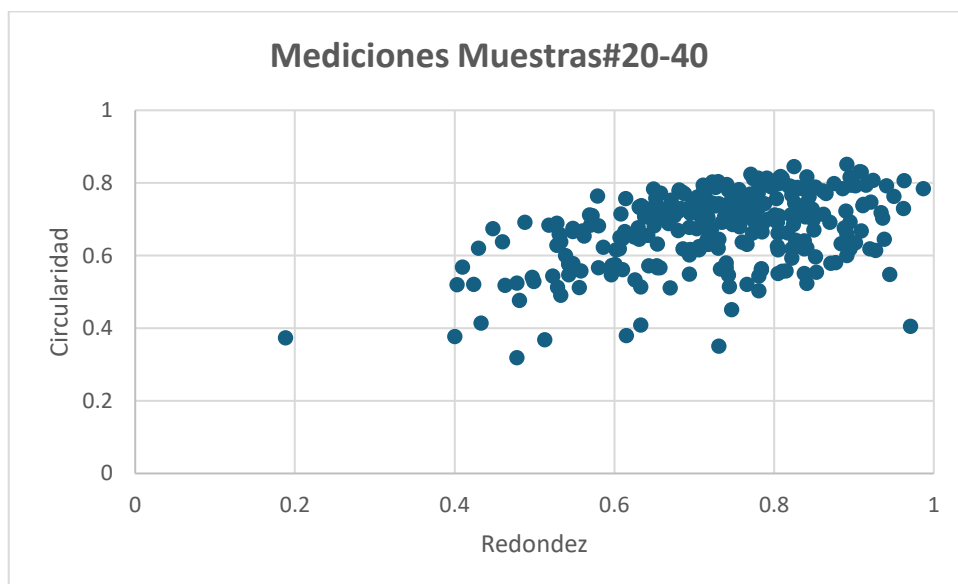


Figura 33. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 20/40.

En la fracción 30/40 se midieron 148 granos de arena (Fig. 34); el 81 % de los cuales registró valores superiores a 0,6 para ambos parámetros.

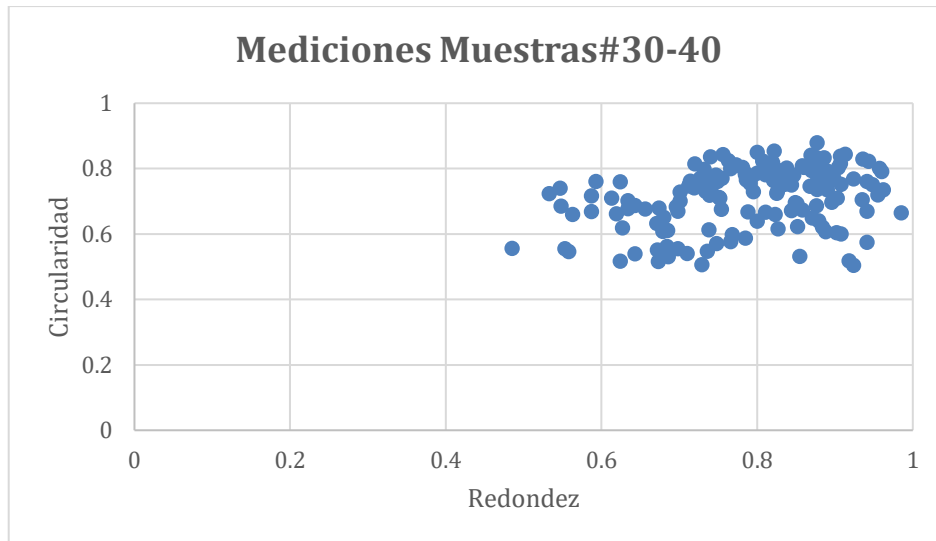


Figura 34. Mediciones de esfericidad y redondez de muestras de arena de Neuquén fracción 30/40.

9.4. Tratamiento estadístico

Los siguientes diagramas de caja (Figs. 35 y 36) muestran la distribución de circularidad y redondez para cada grupo (fracción granulométrica) de muestra.

La línea dentro del recuadro representa el valor de la mediana de los datos para cada grupo de muestra. Los bordes de la caja representan los cuartiles primero (Q1) y tercero (Q3). Esto significa que el 25% de los datos cae por debajo de Q1, y el 75% cae por debajo de Q3. El rango intercuartílico (IQR), que es la distancia entre Q1 y Q3, muestra la dispersión del 50% medio de los datos. Los puntos que quedan fuera de los “bigotes” se consideran valores atípicos potenciales.

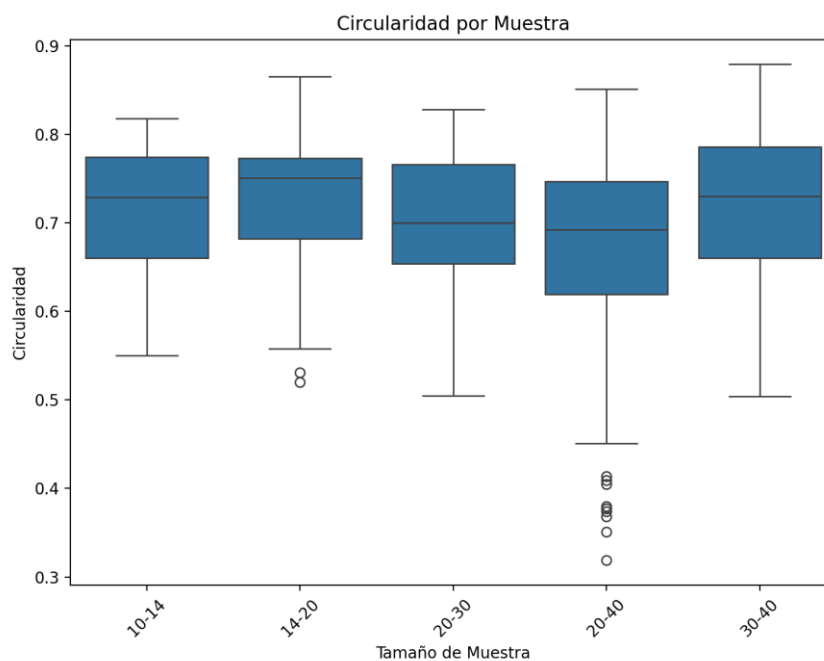


Figura 35. Diagramas de caja de circularidad por fracción granulométrica de arena del área de estudio.

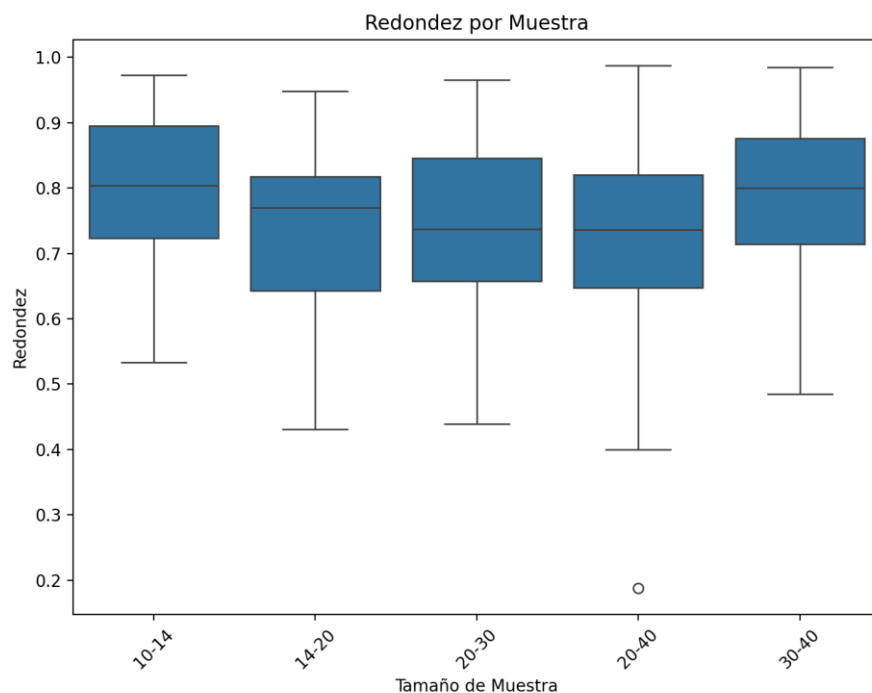


Figura 36. Diagramas de caja redondez por fracción granulométrica de arena del área de estudio.

9.5. Resultados

Las muestras de arena del área de estudio presentan variaciones en sus características morfológicas según las distintas fracciones granulométricas (Cuadros 8 y 9). Mientras que la circularidad promedio se mantiene relativamente constante entre las diferentes muestras, la redondez muestra mayor variabilidad, con valores más altos en las fracciones 10/14 y 30/40.

Circularidad

Cuadro 8. Estadísticas de circularidad para las muestras de arena estudiadas.

Muestra	cantidad	media	σ	min	25%	50%	75%	max
10-14	35.00	0.71	0.07	0.55	0.66	0.73	0.77	0.82
14-20	48.00	0.72	0.09	0.52	0.68	0.75	0.77	0.86
20-30	87.00	0.70	0.08	0.51	0.65	0.70	0.77	0.83
20-40	280.00	0.67	0.10	0.32	0.62	0.69	0.75	0.85
30-40	148.00	0.71	0.09	0.50	0.66	0.73	0.79	0.88

Redondez

Cuadro 9. Estadísticas de Redondez para las muestras de arena estudiadas.

Muestra	cantidad	media	σ	min	25%	50%	75%	max
10-14	35.00	0.80	0.12	0.53	0.72	0.80	0.90	0.97
14-20	48.00	0.74	0.12	0.43	0.64	0.77	0.82	0.95
20-30	87.00	0.74	0.13	0.44	0.66	0.74	0.85	0.96
20-40	280.00	0.72	0.13	0.19	0.65	0.74	0.82	0.99
30-40	148.00	0.79	0.11	0.48	0.71	0.80	0.88	0.98

Al plotear los valores de la totalidad de fracciones granulométricas de la arena estudiada (Fig. 37) se observa que:

Para la circularidad:

- La fracción 20/40 tiene el mayor porcentaje (21.79%) de valores bajo 0.6
- La muestra 10-14 tiene el menor porcentaje (5.71%)

Para la redondez:

- Las fracciones 20/30 y 20/40 tienen los mayores porcentajes de valores menores a 0,6 (16.09% y 16.43%).
- Las muestras 10/14 y 30/40 tienen los menores porcentajes de valores menores a 0,6(5.71% y 6.76%)

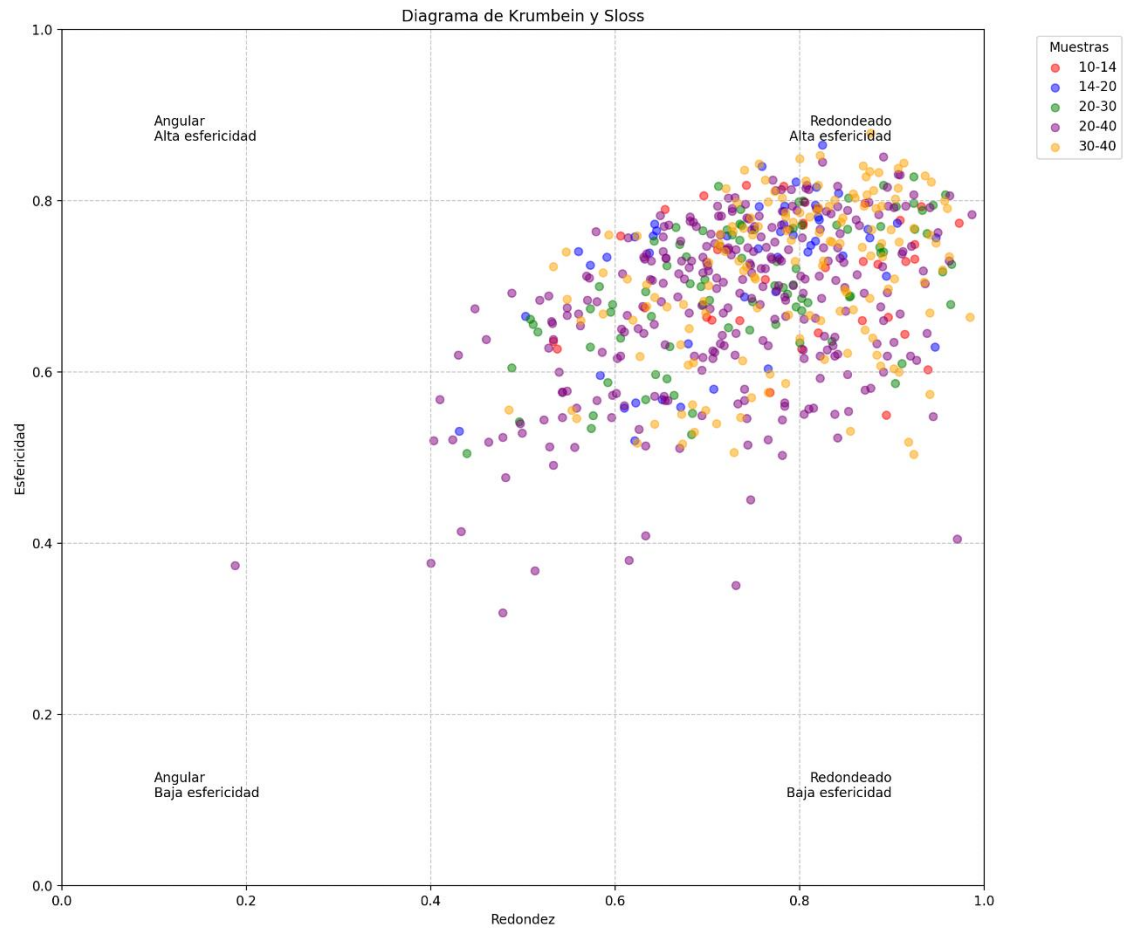


Figura 37. Resultado de los índices de esfericidad y redondez de todas las fracciones granulométricas de la arena estudiada.

10. TRATAMIENTO, LOGÍSTICA Y CONSIDERACIONES AMBIENTALES DE LAS ARENAS

10.1. Tratamiento de arenas

Los procesos de tratamiento para la arena de sílice, particularmente para la producción de arenas para su uso como apuntalante en la fracturación hidráulica, son críticos para garantizar que el producto final cumpla con las estrictas especificaciones requeridas por la industria. El tratamiento generalmente se divide en dos fases principales: el proceso húmedo y el proceso seco.

10.1.1. Proceso húmedo

La fase inicial consiste en lavar la arena para eliminar impurezas y contaminantes. Esto se logra a través de una combinación de agua y agitación mecánica (Fig. 38). El proceso de lavado es esencial para asegurar que la arena cumpla con los estándares de calidad requeridos para la producción de apuntalantes.



Figura 38. Cilindro lavador para realizar el lavado primario. Fuente: Bouso, 2020

Después del lavado, la arena se clasifica en diferentes tamaños. El proceso de clasificación asegura que la arena se clasifica de acuerdo con los requerimientos del mercado, lo cual es vital para su uso previsto en industrias como petróleo y gas.

Los hidrociclones (Fig. 39) se emplean durante la fase de lavado para separar partículas finas de la arena. Utilizan la fuerza centrífuga para mejorar la eficiencia del proceso de lavado, asegurando que las impurezas se eliminen de manera efectiva.

Los efluentes generados durante el proceso de lavado deben ser tratados para cumplir con la normativa ambiental. La pulpa de las etapas de lavado, que contiene partículas finas, se envía a clarificadores de alto rendimiento. Estos clarificadores operan mediante sedimentación forzada, permitiendo el espesamiento de sólidos y la generación de agua clarificada, la cual puede ser reutilizada en el proceso de lavado.



Figura 39. Hidrociclón. Fuente: Bouso, 2020

El diagrama de la figura 40, muestra un circuito "típico" de una planta de lavado, con Cilindro Lavador, Cribas, Hidrociclones y Escurridores, según lo descrito anteriormente, incluyendo la etapa de Clarificación de las aguas de lavado.

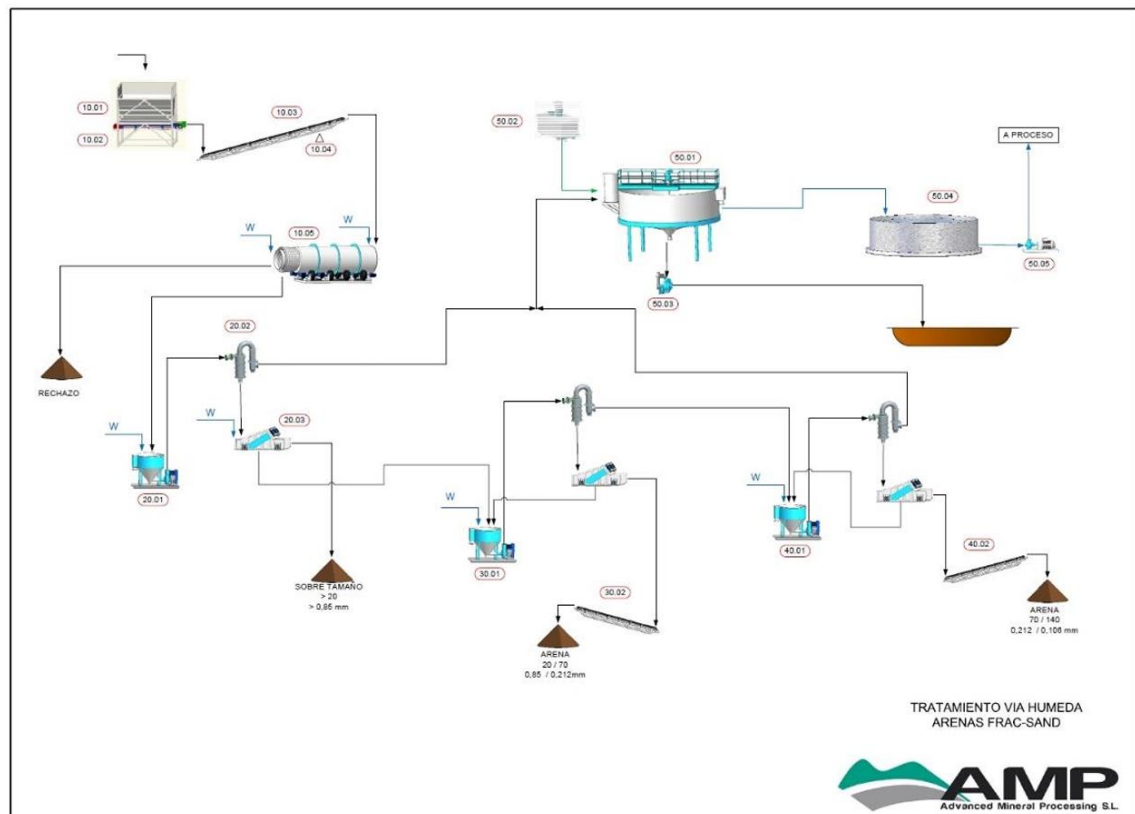


Figura 40. Circuito de una planta de lavado. Fuente: Bouso, 2020

10.1.2. Proceso en seco

Después del procesamiento húmedo, la arena debe secarse para eliminar cualquier humedad residual. Este paso es crítico para asegurar que la arena cumpla con las especificaciones de contenido de humedad requeridas para su uso previsto. El secado generalmente se logra utilizando equipos de secado especializados como secadores rotativos.

10.1.3. Clasificación final

Una vez seca, la arena se somete a una clasificación final para asegurar que cumple con los requisitos de tamaño específicos para diversas aplicaciones. Este paso es esencial para producir arenas de alta calidad que se pueda utilizar en fracturación hidráulica y otras aplicaciones industriales y para esto se utilizan cribas especiales (Fig. 41) provistas de mallas de acero inoxidable con buena superficie de cribado.



Figura 41. Criba. Fuente: Bouso, 2020

10.2. Logística y Cadena de Suministro

Las arenas importadas llegan a Argentina a través de los puertos de Buenos Aires y Bahía Blanca. Históricamente, el puerto de Buenos Aires fue el principal punto de entrada, aunque en años recientes Bahía Blanca ha ganado relevancia por su cercanía a la Cuenca Neuquina. Esta proximidad permite reducir significativamente los costos y tiempos de transporte terrestre.

Los buques de carga utilizados para estas operaciones tienen capacidad para transportar hasta 10.000 toneladas de arena en contenedores de 33 toneladas. Una vez en el puerto, la arena es descargada y transportada por camiones tipo plancha o por trenes hacia los centros logísticos en Neuquén y Añelo. El transporte ferroviario, aunque más eficiente para grandes volúmenes, se ve limitado por la falta de infraestructura adecuada en las zonas de explotación.

Las arenas nacionales, son trasladadas a Neuquén y Añelo por camiones o por ferrocarril. En el caso de las arenas que se extraen en Entre Ríos, el transporte se realiza por camiones a lo largo de la Ruta Nacional 14 y otras rutas hacia el sur.

Por otro lado, para las arenas que se extraen de Río Negro y Neuquén, el transporte es más eficiente debido a la proximidad y se realiza por camiones. También se utilizan ferrocarriles, como el Ferrocarril Bahía Blanca-Zapala, para reducir costos y llevar mayores volúmenes de arena en un solo envío.

Al llegar a Neuquén, la arena es almacenada en centros logísticos estratégicamente ubicados cerca de los yacimientos de Vaca Muerta. Empresas especializadas gestionan estas instalaciones, que están equipadas con galpones cubiertos y, en menor medida, con silos. Los galpones pueden almacenar hasta 11.000 toneladas de arena, protegiéndola de las inclemencias del tiempo y facilitando su manipulación mediante autoelevadores.

Aunque los silos ofrecen ventajas en términos de rapidez de carga y descarga, su implementación está limitada por la infraestructura ferroviaria.

Desde los centros de almacenamiento, la arena se transporta a las locaciones de perforación mediante camiones con tolvas neumáticas. Estos camiones tienen una capacidad de carga de 30 toneladas y permiten una descarga eficiente en menos de 30 minutos. Este sistema a granel ha reemplazado progresivamente el uso de bolsones, mejorando los tiempos operativos y reduciendo los riesgos asociados al manejo manual.

Una alternativa tecnológica que ha comenzado a implementarse es el uso de Sandboxes. Estos contenedores modulares permiten transportar hasta 22 toneladas de arena por unidad y destacan por su facilidad de manejo y su capacidad para reducir el polvo de sílice en suspensión. Cada camión puede llevar un Sandbox lleno o dos vacíos, y el proceso de descarga toma apenas cinco minutos, lo que representa una mejora sustancial en comparación con los sistemas tradicionales.

En el sitio de fractura, la arena se descarga en grandes contenedores fijos conocidos como Mountain Movers o Sand Chiefs. Desde allí, se alimenta a las mezcladoras o blenders, que combinan la arena con agua y aditivos químicos antes de inyectar la mezcla al pozo. Este proceso debe realizarse con precisión para garantizar una fracturación eficiente y segura.

Para minimizar los riesgos laborales y ambientales, se han implementado estrictas medidas de seguridad. Los sistemas cerrados de descarga y el uso de equipos automatizados han reducido significativamente la exposición al polvo de sílice y los riesgos asociados a la carga de arena.

La figura 42 muestra la cadena de suministro de la arena ilustrando lo anteriormente descrito.



Figura 42. Cadena de suministro de las arenas síliceas. Fuente: Bonapace, 2016

10.2.1. Desafíos de la Cadena de Abastecimiento

A pesar de los avances, la cadena de abastecimiento de arenas en Argentina enfrenta varios desafíos. La infraestructura ferroviaria limitada obliga a depender del transporte por camión, lo que incrementa los costos y genera un desgaste considerable en las rutas. Además, el alto costo operativo y los problemas de logística de última milla afectan la eficiencia del proceso. La falta de una red ferroviaria que conecte Bahía Blanca con Añelo es una de las principales barreras para optimizar el transporte a granel.

10.2.2. Oportunidades de Mejora

Para superar estos desafíos, es esencial invertir en la expansión de la red ferroviaria y en el desarrollo de proveedores locales de arena sílicea. La implementación de tecnologías innovadoras, como los Sandboxes, puede mejorar la eficiencia y reducir los riesgos operativos. Asimismo, la mejora de la infraestructura vial y la construcción de centros logísticos más avanzados contribuirán a optimizar la cadena de suministro.

10.3. Consideraciones ambientales de la explotación de arenas

Como se mencionara en capítulos anteriores, las arenas síliceas son un componente esencial en la técnica de fracturación hidráulica (fracking) utilizada en la explotación de hidrocarburos no convencionales. Sin embargo, su extracción, tratamiento, traslado y uso tienen varios impactos ambientales (Gavriletea, 2017; Kowalska y Sobczyk, 2014) a tener en cuenta:

- **Modificación del Hábitat** : La extracción de arena sílicea conduce a la modificación de hábitats locales, afectando la biodiversidad y perturbando los ecosistemas. Este impacto es particularmente significativo en áreas donde las explotaciones mineras ocurren cerca de zonas ecológicas sensibles.
- **Degradación del suelo**: Las actividades mineras pueden resultar en erosión y degradación del suelo, lo que disminuye la calidad del mismo y afecta la productividad

agrícola en las zonas aledañas. La eliminación de la capa superior del suelo puede conducir a la degradación del mismo a largo plazo.

- **Modificación de parámetros físico-químicos del agua:** La minería de arena sílicea puede modificar las fuentes de agua locales a través de la escorrentía, que puede transportar los sedimentos proveniente del lavado de las arenas a ríos y lagos, impactando la vida acuática y la calidad del agua.
- **Problemas de calidad del aire:** El polvo generado durante las operaciones mineras puede conducir a un deterioro de la calidad del aire, planteando riesgos para la salud de las comunidades cercanas y la vida silvestre. Este polvo puede contener partículas de sílice, que son dañinas cuando se inhala.
- **Alteración de Paisajes:** La alteración física de los paisajes debido a la extracción de arenas síliceas (figura 43) puede conducir a cambios en los patrones de drenaje y una mayor vulnerabilidad a las inundaciones, afectando tanto a los sistemas naturales como humanos.



Figura 43. Vista aérea de una operación minera de arenas síliceas en Wisconsin. Fuente: King, 2022.

10.3.1. Estudios y Recomendaciones

En Entre Ríos, la extracción de arenas síliceas ha generado preocupaciones ambientales debido a la contaminación del agua y la degradación del suelo. Un estudio realizado por la Universidad Nacional de La Plata en 2023, presentado en una audiencia pública en Ibicuy, Entre Ríos, destacó la necesidad de un control más riguroso sobre la cantidad de arena extraída y la implementación de políticas para mitigar los impactos ambientales. Además, se ha señalado la importancia de procesar la arena localmente para agregar valor y reducir los costos de transporte.

En Neuquén, la extracción de arenas para fracking ha generado conflictos con las comunidades locales debido a los impactos ambientales y la falta de beneficios económicos tangibles.

En Chubut, la extracción de arenas silíceas en localidades como Dolavon ha sido ampliamente criticada por medios locales y organizaciones ambientalistas por su impacto ambiental y social. Un artículo periodístico (Río Negro, 2018a) manifestó que la actividad minera ha llevado a la contaminación del agua y la degradación del suelo, además de generar conflictos con las comunidades locales. La extracción de arena también ha sido vinculada a problemas de salud debido a la exposición al polvo de sílice.

La extracción de arenas silíceas en Río Negro ha crecido significativamente debido a la demanda de arenas de cercanía para su uso en la fracturación hidráulica en Vaca Muerta. Un artículo periodístico (Río Negro, 2018b) destaca que la extracción de arenas en Allen ha generado preocupaciones ambientales y sociales, incluyendo la degradación del suelo y la contaminación del agua.

11. CONCLUSIONES

- El mercado mundial de arena de sílice, particularmente para uso en fracturación hidráulica, está experimentando un crecimiento significativo y continuo impulsado por la creciente demanda de producción hidrocarburos y, si bien hay desarrollo y crecimiento de otros apuntalantes con mejores características, el mercado sigue eligiendo a las arenas silíceas por su excelente relación entre costos y beneficios.

- En particular, el mercado de arenas silíceas de fractura en Argentina también ha verificado ese crecimiento significativo, impulsado por el desarrollo de Vaca Muerta. La producción nacional ha aumentado (a la proveniente de la provincia de Entre Ríos se ha sumado la de Río Negro), pero aún depende de importaciones para satisfacer la demanda. Los desafíos principales incluyen mejorar la calidad del producto nacional y optimizar la logística y equilibrar la producción local con las importaciones. La inversión en tecnología y la mejora de la infraestructura serán cruciales para aumentar la competitividad de la producción nacional.

- La exploración de arenas silíceas en Argentina es incipiente; en los últimos cinco años ha obtenido aportes de organismos y gobiernos provinciales, y es el objetivo de numerosas empresas proveedoras de la industria de hidrocarburos. Los objetivos han dejado de ser arenas sobrecalificadas, de yacimientos lejanos, para pasar a ser arenas de calidad límite o inferior en depósitos lo más cercanos posibles a la Cuenca Neuquina.

- La licencia social para la extracción de arena está determinada por el activismo ambiental y la opinión pública a favor o en contra del desarrollo productivo. Esta dinámica subraya la necesidad de un diálogo continuo y de estrategias de gobernanza adaptativas para equilibrar el desarrollo económico con el bienestar de la comunidad.

- Aún restan investigaciones sobre procesos de mejoras de calidad de las arenas silíceas para fracking, entre ellas las vinculadas con tecnología aplicada. Las mediciones digitales de parámetros morfométricos a poblaciones de muestras, con las técnicas presentadas en este Trabajo, constituyen un aporte a las determinaciones de calidad de material.

- La técnica de detección remota (teledetección) de depósitos de arenas silíceas, como la desarrollada y presentada en este Trabajo, ha validado su aplicación a partir de comparaciones con datos de gabinete (mapas geológicos) y de terreno (reconocimiento de depósitos de arena silícea). Por lo tanto, constituye otro aporte valioso a la exploración de depósitos de arena para fracking en Argentina, de aplicación inmediata y previa a la determinación de objetivos o targets exploratorios.

- Los procesos de tratamiento para la arena de sílice están meticulosamente diseñados para asegurar que el producto final cumpla con los altos estándares requeridos por la industria. La combinación de procesos húmedos y secos, junto con el uso de maquinaria avanzada, juega un papel crucial en la producción de arenas silíceas de alta calidad adecuada para su uso en la

fracturación hidráulica. Cada paso en el proceso de tratamiento es esencial para lograr las especificaciones deseadas y asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental.

12. AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Carlos Herrmann por sus valiosos aportes y sugerencias, que enriquecieron significativamente este trabajo.

Extiendo mi gratitud al Servicio Geológico Minero Argentino por brindarme el tiempo y los recursos necesarios para llevar a cabo esta especialización.

Agradezco también a la Dra. Liliana Castro, al Dr. Martín Gozálvez y a los demás miembros del jurado por sus correcciones y comentarios, los cuales contribuyeron de manera notable a la mejora de este trabajo.

Un especial reconocimiento a la Lic. Inés Korzeniewski por su colaboración.

A mis compañeros de la especialización, gracias por la camaradería, la buena disposición y la generosidad compartida durante este camino.

Finalmente, a mi esposa Karina y a mis hijos Agustín y Julieta, mi más sincero agradecimiento por su incondicional apoyo, comprensión y aliento en cada paso de este proceso.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute. 1995. Recommended practices for testing sand used in hydraulic fracturing operations .2.^a ed. American Petroleum Institute. (API RP-56) (Retirado).

American Petroleum Institute. 2008. Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations. American Petroleum Institute. (API RP-19C).

Anderson, F. J. 2011. Investigation of sand resources in North Dakota: Sedimentological characterization of surficial sand deposits for potential use as proppant (RI-110). North Dakota Geological Survey.

Arrospide, M. 1999 a. Arenas síliceas de Diamante, Entre Ríos. En E. O. Zappettini (Ed.), Recursos minerales de la República Argentina. Anales 35, pp. 1893-1895. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR.

Arrospide, M. 1999 b. Arenas síliceas de Ibicuy, Entre Ríos. En E. O. Zappettini (Ed.), Recursos minerales de la República Argentina Anales 35, pp. 1897-1898. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR.

Beckwith, R. 2011. Proppants: Where in the World. Journal of Petroleum Technology, 63(04), 36–41. doi:10.2118/0411-0036-jpt

Belyadi, H., Fathi, E., y Belyadi, F. (2017). Proppant Characteristics and Application Design. Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs, 73–96. doi:10.1016/b978-0-12-849871-2.00006.

Benson, M. E., Wilson, A. B. 2015. Frac sand in the United States—A geological and industry overview. U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1107. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/ofr20151107>

Bonapace, J. C. 2016, junio. Proppant management: A new challenge to develop unconventional reservoirs in Argentina. SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Port of Spain, Trinidad y Tobago. Disponible en: <https://doi.org/10.2118/180818-MS>

Bouso, J. 2020. Arenas en la fracturación hidráulica. Disponible en: <https://ampmineral.com/wp-content/uploads/2019/10/Arenas-en-la-fracturacion-hidraulica.pdf>

Celeda, A. M., Mari, E. A. 1994. Arenas para la industria del vidrio. Características y procesos de purificación. Publicación Técnica INTEMIN, N.º 1. Secretaría de Minería, Instituto Nacional de Tecnología Minera.

Christel, L. y Novas, M. A. 2018. Incentivos económicos y conflictividad social. Trayectorias disimiles del fracking en las provincias argentinas (Entre Ríos y Neuquén 2010-2017). Revista POSTData Vol. 23 Nº 2 p. 491-525.

Clark, R. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, Tomo 3: pp.3-58, New York

CRU Consulting. 2018. Arenas síliceas: Características y análisis del mercado internacional de minerales en el corto, mediano y largo plazo con vigencia al año 2035. Unidad de Planeación Energética, Chile.

Diario Río Negro. 2018a. Investigación de “Río Negro” abre polémica en Chubut. Disponible en: NRG en Allen: rechazan que se procesen arenas de fracking en el ejido - Diario Río Negro

Diario Río Negro. 2018b. NRG en Allen: rechazan que se procesen arenas de fracking en el ejido. Disponible en: NRG en Allen: rechazan que se procesen arenas de fracking en el ejido - Diario Río Negro

Dumbrell, N. P., Adamson, D., Zuo, A., Wheeler, S. A. 2021. How do natural resource dependent firms gain and lose a social licence? *Global Environmental Change*, 70, 102355. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102355>

Economides, M. J., y Nolte, K. G. 2000. Reservoir stimulation (3.^a ed.). En Wiley (ed.). ISBN: 9780471491927.

Gallagher, D. G. 2011. The hierarchy of oily conductivity. *Journal of Petroleum Technology*, 63(4), 18-19.

Garrido, A.C. 2000. Estudio estratigráfico y reconstrucción paleoambiental de las secuencias fosilíferas continentales del Cretácico Superior en las inmediaciones de Plaza Huincul, provincia del Neuquén. Escuela de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Trabajo Final para el Título de Grado. 78 pp.

Gavriletea, Marius. 2017. Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. Sustainability. 9. 1118. 10.3390/su9071118.

Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., Rock, B. N. 1985. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228(4704), 1147-1153.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. Disponible en; <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Heilbronner, R., Barrett, S. 2013. Image analysis in Earth Sciences: Microstructures and textures of earth materials. Vol. 129. Springer.

Herrmann, C., Gozálvez, M. 2016. Las arenas en la industria del petróleo. Arenas para fracking. *Revista Panorama Minero*, 444. Disponible en: <https://panorama-minero.com/ediciones-panorama-minero/edicion-no-444-octubre-2016/>

Hugo, C.A. y Leanza, H. A. 2001. Hoja Geológica 3969IV, General Roca. Provincias de Río Negro y Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 308, 65 p. Buenos Aires.

International Organization for Standardization. 2006. ISO 13503-2:2006/API RP-19C, Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations. International Organization for Standardization.

Iwasaki, A., y Tonooka, H. 2005. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12), 2747–2751.

King, H. M. 2022. What is Frac Sand?. *Geology.com*. Disponible en: What is Frac Sand? A Durable Sand for Hydraulic Fracturing ([geology.com](https://www.geology.com))

- Kowalska, A., Sobczyk, W. 2014. Negative and Positive Effects of the Exploitation of Gravel-Sand. *Inżynieria Miner.*, 15, 105–109.
- Krumbein, W. C., Sloss L. L. 1951. *Stratigraphy and sedimentation*. W.H.Freeman and Co, San Francisco (USA), 497 páginas. <https://doi.org/10.1002/gj.3350010110>
- Leanza, H., et al. 2024. Hoja Geológica 3769-III Chos Malal (Boletín N.º 454). Servicio Geológico Minero Argentino. ISSN: 0328-2333.
- Macellari, C. 2022. Origen y distribución de las arenas in basin para fractura hidráulica de Vaca Muerta. 11.º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG. Relatorio: 135-152, Mendoza.
- Markets and Markets. 2022. Proppants Market | Global Industry Size Forecast. Disponible en: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/proppant-market-802.html>
- Martínez Peck, L., Hughes G. E., Popesciel, G. 2017. IAP Cantera “La Esperanza” – Sr. Hugo Elved Bowen. Disponible en: <https://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2017/07/IAP-CANTERA-LA-ESPERANZA.pdf>
- Más Energía, R. 2024, 22 de junio. Arenas: el quid de la cuestión del fracking. Disponible en: <https://mase.lmneuquen.com/produccion/arenas-el-quid-la-cuestion-del-fracking-n1122824>
- Mejor Energía, R. 2024, 2 de enero. Vaca Muerta superó las 14 mil etapas de fractura en todo el 2023. Disponible en: <https://www.mejorenergia.com.ar/noticias/2024/01/02/2347-vaca-muerta-supero-las-14-mil-etapas-de-fractura-en-todo-el-2023>
- Menga, M., Solsona, M. N. 2019. Panorama de mercado de rocas y minerales industriales. Arenas para fracking. Secretaría de Política Minera, Ministerio de Producción.
- Montgomery, C. T., y Smith, M. B. 2010. Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62(12), 26-40.
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE*, 5234. DOI: 10.1117/12.511902.
- Presley, J. 2023. Elephant Hunt: The Search for the Oil and Gas Supplies to 2050. *J Pet Technol.* 75 ,20–29. doi: <https://doi.org/10.2118/1023-0020-JPT>
- Rojo, J. 2023. Informe anual de hidrocarburos, año 2022. Instituto Argentino de Energía “General Mosconi”. Disponible en: <https://www.iae.org.ar/2023/03/02/informe-anual-de-hidrocarburos-ano-2022>
- Romero, C., Mastronardi, L., y Vila Martinez, J. P. 2017. Desarrollo de Vaca Muerta: Impacto económico agregado y sectorial. Ministerio de Energía y Minería.
- Sacomani, L. y Panza J.L., 1999. Hoja Geológica 4366-III Las Plumas, provincia del Chubut, escala 1:250.000. Boletín 291, Servicio Geológico Minero Argentino, 95 pp.
- Sarquís, P., Cevinelli, H., Castro, G., García, L., y Salem, C. 2018. Efecto de la mineralogía y de la geología en las propiedades de arenas de fracturación. *Actas XIV Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales*, Catamarca.

- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T. 2012. Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 676–682.
- Sciutto, J.C., Césari, O., Iantanos N. Hoja Geológica 4569-IV, Escalante, provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 351, 76 p. Buenos Aires.
- Smith, D. C., y Richards, J. M. 2015. Social license to operate: Hydraulic fracturing-related challenges facing the oil and gas industry. *Oil and Gas, Natural Resources and Energy Journal*, 1(2).
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). 2018. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. Bogotá D.C.
- Universidad Nacional de La Plata. 2023. Estudio de Impacto Ambiental Acumulativo para la Extracción de Arena Silícea Islas del Ibicuy–Informe Final. Disponible en: <https://www.jusentrerios.gov.ar/2023/12/06/extraccion-de-arenas-siliceas-en-ibicuy-esta-disponible-para-la-consulta-publica-el-informe-de-impacto-ambiental/>
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M., Van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., ... y Woldai, T. 2012. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128.
- Xiaohong, W., Conghui, L., y Yiping, P. 2023. Preparation and performance study of coated sand fracturing proppants based on three of resin. *Petroleum Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2193219>
- Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., y Pniel, M. 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1062-1071.
- Zdunczyk, M. 2014. Hydraulic fracturing sand (frac sand). *Mining Engineering*, 66(7), 53–55.